

Technische und rechtliche Rahmenbedingungen des elektromagnetischen Immissionsschutzes in Verteilnetzen

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von Matthias Schilcher
aus Garmisch-Partenkirchen

eingereicht am: 16.12.2020

mündliche Prüfung am: 02.03.2021

1. Referent: Prof. Dr. Achim Enders
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Matthias Wuschek

Druckjahr: 2021

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	VII
Abstract	IX
Symbolverzeichnis	XI
1 Einführung	1
2 Physikalische, biologische und juristische Grundlagen	3
2.1 Entstehung elektrischer und magnetischer Felder	3
2.2 Rechengenauigkeit und mögliche Störeinflüsse	7
2.2.1 Numerische und modellierungstechnische Effekte	7
2.2.2 Beeinflussung des elektrischen Feldes durch Fremdkörper	9
2.3 Wirkungsweise der Abschirmung von Magnetfeldern	11
2.3.1 Ferromagnetische Schirmwirkung	11
2.3.2 Abschirmung durch Induktion und Gegeninduktion	12
2.4 Ansätze zur Feldminimierung	14
2.5 Elektrotechnische Festlegungen	15
2.6 Biologische Wirkungen elektrischer und magnetischer Felder	16
2.7 Rechtliche Regelungen zu elektrischen und magnetischen Feldern in Deutschland . .	19
2.7.1 26. BImSchV	19
2.7.2 26. BImSchVVwV	21
2.7.3 Sonstige Vorschriften	23
3 Wirksamkeit der Maßnahmen gemäß 26. BImSchVVwV	25
3.1 Freileitungen	26
3.1.1 Optimieren der Leiteranordnung	35
3.1.2 Abstandsoptimierung	59
3.1.3 Elektrische Schirmung	73
3.1.4 Minimieren der Seilabstände	79
3.1.5 Optimieren der Mastkopfgeometrie	82
3.1.6 Schlussfolgerungen	83
3.2 Erdkabel	85
3.2.1 Optimieren der Leiteranordnung	88
3.2.2 Optimieren der Verlegetiefe	101
3.2.3 Minimieren der Kabelabstände	108

3.2.4	Optimieren der Verlegegeometrie	119
3.2.5	Schlussfolgerungen	121
3.3	Ortsnetzumspannstationen	123
3.3.1	Kompaktstation 2817	126
3.3.2	Fertigstation 4227	131
3.3.3	Schlussfolgerungen	135
3.4	Umspannwerke und Schalthäuser	137
3.4.1	Minimieren der Distanzen zwischen Betriebsmitteln mit unterschiedlicher Phasenbelegung	141
3.4.2	Abstandsoptimierung	142
3.4.3	Schlussfolgerungen	151
4	Sonstige Minimierungsmaßnahmen	153
4.1	Verlegung von Kabeln in Metallrohren	153
4.1.1	Rechnerische Betrachtung	153
4.1.2	Messtechnische Überprüfung	156
4.2	Magnetische Schirmplatten	157
4.3	Aktive und passive Kompensationsleiter	159
5	Rechtliche Einordnung der 26. BImSchVVwV	161
5.1	Normkonkretisierende Teile der 26. BImSchVVwV	161
5.1.1	Überblick über Verwaltungsvorschriften	161
5.1.2	Rechtsprechung und Literatur	166
5.1.3	Einordnung als normkonkretisierende Verwaltungsvorschrift	167
5.1.4	Vergleich mit TA Luft und TA Lärm	171
5.1.5	Ergebnis	174
5.2	Ermessenslenkende Teile der 26. BImSchVVwV	175
5.2.1	Ermessen und ermessenslenkende Verwaltungsvorschriften	175
5.2.2	Ermessenslenkende Eigenschaft von Abschnitt 3.2.3 der 26. BImSchVVwV . .	179
5.2.3	Ergebnis	181
5.3	Folgen für den verwaltungsgerichtlichen Rechtsschutz	181
5.3.1	Szenarien	182
5.3.2	Klagebefugnis	182
5.3.3	Erfolgsaussichten	183
6	Verschiedene Aspekte zur Feldüberlagerung mehrerer Anlagen	185
6.1	Niederfrequenz-Überlagerung	186
6.2	Hochfrequenz-Überlagerung	193
6.2.1	Modellierung der Antenne	194
6.2.2	Ergebnisse	198
7	Fazit	205

Literaturverzeichnis	207
Abbildungsverzeichnis	213
Tabellenverzeichnis	221

Zusammenfassung

Die Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV) legt in Deutschland Grenzwerte für von ortsfesten Anlagen ausgehende elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder an für die Allgemeinbevölkerung zugänglichen Orten fest. Zusätzlich zur Grenzwerteinhaltung wird im Bereich der energietechnischen Anlagen seit dem Jahr 2016 über eine zusätzlich erlassene Verwaltungsvorschrift (26. BImSchVVwV) eine möglichst starke Verringerung der elektrischen und magnetischen Felder verlangt. Zu diesem Zweck führt die 26. BImSchVVwV eine Reihe von Minimierungsmaßnahmen auf, die bei Errichtung und/oder wesentlicher Änderung einer solchen Anlage zu prüfen und gegebenenfalls umzusetzen sind.

Diese Minimierungsmaßnahmen sind zwar in weiten Teilen grundsätzlich wirksam, ihrer Verwirklichung stehen aber oftmals praktische Gründe oder andere Schutzgüter entgegen. Wenige dieser Maßnahmen sind entgegen den Angaben der 26. BImSchVVwV wirkungslos oder bewirken unter Umständen sogar eine Erhöhung der Feldstärken. Es existieren zwar noch weitere technisch wirksame Minimierungsmaßnahmen, die nicht in der 26. BImSchVVwV aufgeführt sind, doch scheiden diese aus technischen Gründen oder aus Gründen der Unverhältnismäßigkeit zwischen Aufwand und Nutzen aus.

Gleichwohl führen die erkannten Defizite der 26. BImSchVVwV nicht zu ihrer juristischen Angreifbarkeit. Dies liegt daran, dass die 26. BImSchVVwV als sogenannte normkonkretisierende Verwaltungsvorschrift – wie im Rahmen dieser Arbeit vertreten – nur einer eingeschränkten gerichtlichen Kontrolle unterliegt und die von ihr als wirksam postulierten Minimierungsmaßnahmen daher auch in einem etwaigen Gerichtsverfahren als solche anzusehen wären. Aus diesem Grund und wegen des von der 26. BImSchVVwV eingeräumten Ermessensspielraums wird es einem betroffenen Netzbetreiber oder einem beteiligten immissionsschutzrechtlichen Nachbarn nur in Ausnahmefällen möglich sein, eine gegebenenfalls von einer Behörde getroffene Auswahl durchzuführender Minimierungsmaßnahmen rechtlich anzugreifen bzw. zusätzlich durchzuführende Maßnahmen durchzusetzen.

Abgesehen davon weist die 26. BImSchV auch besondere Vorschriften zur Sicherstellung der Grenzwerteinhaltung für den Fall auf, dass sich elektrische, magnetische und/oder elektromagnetische Felder unterschiedlicher Frequenzen überlagern. Geht es um das Zusammenwirken niederfrequenter Felder, so stellt die von der 26. BImSchV vorgesehene betragsmäßige Addition der Grenzwertausschöpfungsgrade zwar eine konservative, jedoch nicht übermäßig vorsichtige und daher durchaus praxisnahe Vorgehensweise zur Sicherstellung der Grenzwerteinhaltung dar. Im Falle der Überlagerung der Felder einer Nieder- und einer Hochfrequenzanlage führen die Eigenheiten des Nahfeldes der Hochfrequenzanlage und die Ausgestaltung der Feldstärkegrenzwerte im Hochfrequenzbereich dazu, dass in der Praxis nur bei der elektrischen Feldstärke eine Prüfung auf Grenzwerteinhaltung bei Feldüberlagerung erforderlich ist, während diese bei der magnetischen Feldstärke vernachlässigt werden kann.

Abstract

The German Ordinance on Electromagnetic Fields (26. BImSchV) establishes limiting values for electric, magnetic and electromagnetic fields originating from fixed installations in places accessible to the general public. In addition to compliance with those limiting values, from 2016 on an additionally issued administrative regulation called the 26. BImSchVVwV also requires the greatest possible minimization of electric and magnetic field strengths, as far as energy equipment is concerned. For this purpose, the 26. BImSchVVwV lists a number of minimization measures that must be examined and, if applicable, implemented whenever such equipment is newly constructed and/or significantly modified.

Although most of these minimization measures are effective in principle, their implementation is often opposed to practical reasons or other protected interests. Few of these measures are, contrary to what the 26. BImSchVVwV states, ineffective or may even cause an increase in field strengths. There are other technically effective minimization measures that are not listed in the 26. BImSchVVwV, but these are ruled out for technical reasons or for reasons of disproportionate effort and benefit.

Nevertheless, the deficits of the 26. BImSchVVwV identified above do not lead to its legal vulnerability. This is due to the fact that the 26. BImSchVVwV, as a so-called norm-concretizing administrative regulation (as categorized in the context of this work), is only subject to limited judicial control and the minimization measures it postulates as effective should therefore also be regarded as such in legal proceedings. For this reason and because of the discretion granted by the 26. BImSchVVwV, an affected grid operator or a neighbor will only in exceptional cases be able to legally attack a selection of minimization measures carried out by an authority or to enforce additional measures, respectively.

Apart from this, the 26. BImSchV also establishes rules to ensure compliance with the limiting values in the event that electric, magnetic and/or electromagnetic fields of different frequencies overlap. As far as only low-frequency fields are concerned, the addition of the absolute exploitation ratios of the limiting values as defined by the 26. BImSchV is a conservative, but not overly cautious and therefore quite practical approach to ensure compliance with limiting values. In the case of overlapping fields from a low- and a high-frequency installation, the properties of the near field of the high-frequency installation and the peculiarities of the limiting values lead to an investigation for compliance with the limiting values being necessary only for the electrical field strength, whereas such investigation can be neglected in practice for the magnetic field strength.

Symbolverzeichnis

Erscheint ein Symbol in **Fettdruck**, so handelt es sich um die zugehörige vektorielle Größe.

Lateinische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit bzw. Wert
<i>B</i>	magnetische Flussdichte	$\text{T} = \text{Vs/m}^2$
<i>D</i>	elektrische Flussdichte	As/m^2
<i>E</i>	elektrische Feldstärke	V/m
<i>f</i>	Frequenz	$\text{Hz} = 1/\text{s}$
<i>H</i>	magnetische Feldstärke	A/m
<i>I</i>	elektrischer Strom	A
<i>j</i>	elektrische Stromdichte	A/m^2
<i>Q</i>	elektrische Ladung	$\text{C} = \text{As}$
<i>T</i>	Periodendauer	s
<i>U</i>	elektrische Spannung	V

Griechische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit bzw. Wert
γ	spezifischer elektrischer Widerstand	$\Omega \text{ m}$
δ	Eindringtiefe	m
ϵ	Permittivität	As/V m
ϵ_0	elektrische Feldkonstante	$8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/V m}$
ϵ_r	relative Permittivität	(dimensionslos)
λ	Wellenlänge	m
μ	magnetische Permeabilität	Vs/A m
μ_0	Magnetische Feldkonstante	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/A m}$
μ_r	relative magnetische Permeabilität	(dimensionslos)
ρ	Raumladungsdichte	As/m^3
σ	spezifische elektrische Leitfähigkeit	$1/\Omega \text{ m}$
φ	elektrisches Potential	V
ω	Kreisfrequenz	$1/\text{s}$

1 Einführung

Beginnend mit dem späten 19. Jahrhundert hat sich die Menschheit die Kräfte der Elektrizität dienstbar gemacht. Wurde die Einführung der elektrischen Beleuchtung und des elektrischen Antriebs von Maschinen anfangs noch einhellig als große Erleichterung des Alltags begrüßt, so mehrten sich in den folgenden Jahrzehnten mit der zunehmenden Elektrifizierung der Welt auch die kritischen Stimmen, die gesundheitliche Beeinträchtigungen durch die bei der Fortleitung der elektrischen Energie vom Erzeuger zum Verbraucher entstehenden elektrischen und magnetischen Felder fürchteten. Die dadurch angestoßenen Forschungsarbeiten mündeten in Deutschland beinahe 100 Jahre später in den Erlass der 26. BImSchV, die Grenzwerte für die höchstzulässigen, von ortsfesten Anlagen ausgehenden Feldstärken festlegt, die an Orten für den nicht nur vorübergehenden Aufenthalt der Allgemeinbevölkerung einzuhalten sind.

Die 26. BImSchV wurde im Jahr 2013 einer Überarbeitung unterzogen. Seitdem genügt es nicht mehr, die genannten Grenzwerte einzuhalten. Zusätzlich sind bei der Neuerrichtung oder wesentlichen Änderung von Leitungen und Umspannanlagen die von denselben ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder nach Möglichkeit zu verringern. Diese Minimierungsverpflichtung wirft einige technische und rechtliche Fragestellungen auf, die in den folgenden Kapiteln im Rahmen des Verteilnetzes mit seinen Spannungsebenen von 0,4 bis 110 kV untersucht werden sollen. Zum besseren Verständnis werden zunächst wichtige grundsätzliche physikalische Zusammenhänge und biologische Wirkungsweisen der elektrischen und magnetischen Felder dargestellt sowie die auf dieser Grundlage verabschiedeten gesetzlichen Regelungen aufgelistet. Zusätzlich zur Untersuchung der Rahmenbedingungen der Feldminimierung werden ausgewählte Aspekte der Grenzwerteinhaltung beim Zusammenwirken der Felder mehrerer Quellen betrachtet. Schließlich wird eine abschließende Zusammenfassung gegeben.

2 Physikalische, biologische und juristische Grundlagen

In diesem Kapitel sollen zunächst die physikalischen Grundlagen vorgestellt werden, mittels derer elektrische Ladungen zu einem elektrischen Feld und ein elektrischer Strom zu einer magnetischen Flussdichte führen. Daran schließt sich ein kurzer Überblick darüber an, welche Wirkungen diese Felder auf den menschlichen Körper haben können. Zuletzt wird behandelt, welche gesetzlichen Regelungen auf Grundlage der vorgestellten Zusammenhänge in Deutschland erlassen wurden.

2.1 Entstehung elektrischer und magnetischer Felder

Die physikalische Grundlage aller elektrischen und magnetischen Felder bilden die Maxwell-Gleichungen. Im Einzelnen sind dies das Gaußsche Gesetz (Gleichung 2.1), das Gaußsche Gesetz für Magnetfelder (Gleichung 2.2), das Induktionsgesetz (Gleichung 2.3) und das Durchflutungsgesetz (Gleichung 2.4). Vektorielle Größen werden dabei, wie auch in allen folgenden Abschnitten, durch **Fettdruck** dargestellt.

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (2.1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

Zusätzlich verknüpfen die sogenannten Stoffgleichungen die elektrische Flussdichte \mathbf{D} über die Permittivität ϵ mit der elektrischen Feldstärke \mathbf{E} (Gleichung 2.5) und die magnetische Flussdichte \mathbf{B} über die Permeabilität μ mit der magnetischen Feldstärke \mathbf{H} (Gleichung 2.6). Die Permittivität und die Permeabilität sind dabei Materialfunktionen des umgebenden Stoffes, die sich in eingängigerer Form durch die Kombination der Naturkonstanten ϵ_0 und μ_0 mit den dimensionslosen Faktoren ϵ_r bzw. μ_r ausdrücken lassen. Im Vakuum und in sehr guter Näherung auch in Luft gilt $\epsilon_r = \mu_r = 1$.

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (2.6)$$

Ferner ist die Stromdichte j über die elektrische Leitfähigkeit σ mit der elektrischen Feldstärke E verknüpft (Gleichung 2.7). Dies stellt nichts anderes als die vektorielle Interpretation des Ohmschen Gesetzes dar.

$$j = \sigma E \quad (2.7)$$

Mittels dieser Stoffgleichungen kann in den folgenden Kapiteln auf die Angabe der elektrischen Flussdichte D und der magnetischen Feldstärke H verzichtet werden. Stattdessen sollen nur die in der Energietechnik gebräuchlicheren Formen der elektrischen Feldstärke E und der magnetischen Flussdichte B verwendet werden. Gleichung 2.1 besagt folglich, dass ein elektrisches Feld aus einer elektrischen Raumladung ρ entsteht. Gleichung 2.2 zeigt dagegen, dass es für die magnetische Flussdichte keine derartige Erzeugungsmöglichkeit gibt – es existieren keine magnetischen Ladungen oder magnetischen Monopole. Aus dem Induktionsgesetz (Gleichung 2.3) ist zu erkennen, dass ein elektrisches Feld auch durch die zeitliche Änderung der magnetischen Flussdichte erzeugt werden kann. Das Durchflutungsgesetz (Gleichung 2.4) zeigt schließlich, dass die magnetische Flussdichte sowohl durch einen fließenden elektrischen Strom, ausgedrückt durch seine Stromdichte j , als auch durch die zeitliche Änderung der elektrischen Feldstärke hervorgerufen wird.

Durch dieses System vierer gekoppelter Differentialgleichungen sind elektrische und magnetische Felder dem intuitiven Verständnis zunächst verschlossen. Es ist jedoch möglich, für verschiedene Spezialfälle gewisse Vereinfachungen zu treffen.

Im Falle zeitlich unveränderlicher (statischer) Felder entfallen in den Maxwell-Gleichungen alle Ableitungen nach der Zeit. Elektrostatische Felder hängen damit nur von der Ladungsdichte und magnetostatische Felder nur von der Stromdichte ab. Zwischen elektro- und magnetostatischen Feldern besteht keine wechselweitige Kopplung; beide Felder können unabhängig voneinander oder auch gleichzeitig nebeneinander existieren, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen. Im Gegensatz dazu erzeugen zeitlich veränderliche magnetische Felder elektrische Wirbelfelder (Gleichung 2.3); zeitlich veränderliche elektrische Felder rufen über die zeitliche Ableitung der elektrischen Flussdichte, den sogenannten Verschiebungsstrom, magnetische Wirbelfelder hervor (Gleichung 2.4) ([1] Kapitel 6).

Es existiert der Spezialfall der sogenannten langsam veränderlichen Felder. Bei diesen stimmt eine Momentaufnahme der elektrischen Feldstärke mit dem elektrostatischen Feld einer dem festgehaltenen Moment entsprechenden ruhenden Ladungsverteilung praktisch überein; dasselbe gilt für eine Momentaufnahme der magnetischen Feldstärke und für das Magnetfeld, das von einem dem im betrachteten Moment fließenden Strom entsprechenden Gleichstrom erzeugt wird. Bei dieser quasistatischen Betrachtung ([2] S. 111) sind die Feldbeiträge der zeitlichen Ableitungen in den Gleichungen 2.3 und 2.4 so gering, dass sie vernachlässigt werden können; es ist damit eine entkoppelte Betrachtung der elektrischen und der magnetischen Feldkomponente wie bei statischen Feldern möglich. Bedingung hierfür ist, dass die mechanischen Abmessungen der betrachteten Anordnung deutlich kleiner sind als die Wellenlänge. Dies ist bei der Netzfrequenz von 50 Hz, entsprechend einer Wellenlänge von beinahe 6000 km, im Verteilnetz stets der Fall. Quasistatische Felder besitzen keinen Wellencharakter und sind damit nicht ausbreitungsfähig. Aus diesem Grund kann bei den netzfrequenten Feldern des Verteilnetzes nur von elektrischen und magnetischen Feldern bzw. Flussdichten gesprochen werden; die Begrifflichkeiten der elektromagnetischen Felder, der Wellen und

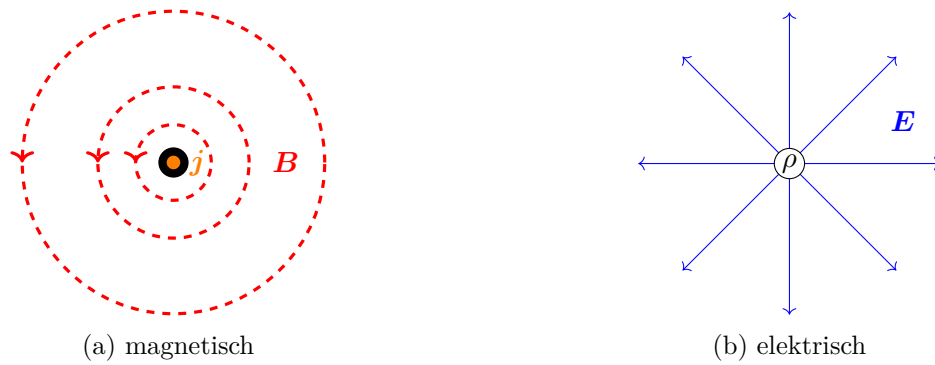


Abbildung 2.1: Feldlinien eines zylindrischen Leiters

der Strahlung bleiben auf den hochfrequenten Bereich beschränkt. Die vorstehenden Betrachtungen beziehen sich nur auf die Verhältnisse in nichtleitenden Stoffen (Isolatoren); für die Betrachtung in einem elektrisch leitfähigen Material sei auf Abschnitt 2.3.2 verwiesen [1].

Beispielhaft sollen unter Anwendung der quasistatischen Betrachtung die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte eines unendlich langen zylindrischen Leiters berechnet werden, wie er beispielsweise in guter Näherung für das Leiterseil einer Freileitung oder für einen Phasenleiter eines Erdkabels angenommen werden kann. Im Falle der magnetischen Flussdichte wird dabei vom Durchflutungsgesetz ausgegangen (Gleichung 2.4), das nach Beiseitelassen der zeitlichen Änderung der elektrischen Flussdichte und Überführung in die integrale Form die in Gleichung 2.8 dargestellte Gestalt annimmt. Durch die Integration der Stromdichte erhält man auf der rechten Seite der Gleichung den Strom I . Unter Anwendung von Gleichung 2.6 kann H durch B ersetzt werden.

$$\oint_{\partial A} \mathbf{B} \, d\mathbf{s} = \mu I \quad (2.8)$$

Im Falle eines zylindrischen Leiters werden zweckmäßigerweise Zylinderkoordinaten verwendet, wobei der zylindrische Leiter in z -Richtung verlaufen soll. Das Ringintegral wird in φ -Richtung ausgeführt und bringt für einen geschlossenen Kreisumlauf um den Rand ∂A einer gedachten Fläche einen zusätzlichen Faktor von 2π . Schlussendlich erhält man für die (in diesem Falle einzige) Komponente von B in φ -Richtung den in Gleichung 2.9 dargestellten Zusammenhang. In Abbildung 2.1a ist dies zeichnerisch dargestellt. Im Falle eines auf den Betrachter zufließenden Stromes ist \mathbf{B} gegen den Uhrzeigersinn gerichtet („Rechte-Faust-Regel“).

$$B_\varphi = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad (2.9)$$

Im Falle des elektrischen Feldes soll der beispielhafte unendlich lange zylindrische Leiter eine homogene Ladungsdichte ρ aufweisen, die mit der Gesamtmenge der Ladung Q über die Länge des Zylinders L nach dem Zusammenhang $Q = \rho L$ verknüpft ist. Das Gaußsche Gesetz (Gleichung 2.1) wird zunächst in die integrale Form überführt (Gleichung 2.10), wobei D gemäß Gleichung 2.5 durch E ersetzt wird.

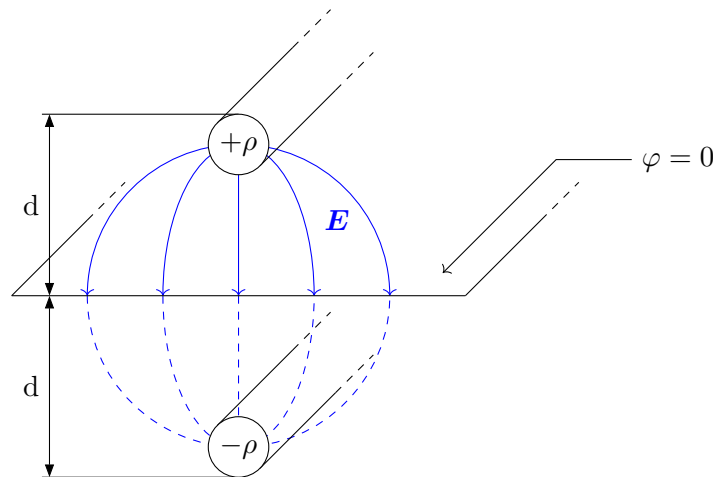


Abbildung 2.2: Spiegelladungsprinzip bei zylindrischen Leitern

$$\iint_A \mathbf{E} \, d\mathbf{A} = \frac{\rho L}{\epsilon} \quad (2.10)$$

Elektrische Feldlinien treten immer im rechten Winkel aus einer leitfähigen Oberfläche aus; eine parallele Komponente würde aufgrund der freien Beweglichkeit der Ladungen umgehend neutralisiert. Deswegen müssen die Feldlinien im betrachteten Beispiel bei Verwendung von Zylinderkoordinaten in radialer Richtung orientiert sein. Die Ausführung des Flächenintegrals über eine gedachte Fläche A in Gleichung 2.10 in φ und in z -Richtung führt damit lediglich zu einer Multiplikation mit den Faktoren 2π und L , wenn der zylindrische Leiter in z -Richtung orientiert ist. Man erhält folglich für die radiale (und einzige) Komponente der elektrischen Feldstärke den in Gleichung 2.11 gezeigten Zusammenhang, der in Abbildung 2.1b zeichnerisch dargestellt ist.

$$E_r = \frac{\rho}{2\pi\epsilon r} \quad (2.11)$$

Bei der Berechnung des elektrischen Feldes von Freileitungen ist zu berücksichtigen, dass der Erdboden eine elektrisch leitfähige Oberfläche darstellt, die per Definition auf Nullpotential ($\varphi = 0$) liegt. Dieses Randwertproblem kann durch das Spiegelladungsprinzip gelöst werden. Dabei wird ein zweiter Linienleiter, dessen Ladung denselben Betrag mit entgegengesetztem Vorzeichen aufweist, mit demselben Abstand auf der anderen Seite der leitfähigen Oberfläche platziert; die Ladung wird gewissermaßen an der Oberfläche gespiegelt (siehe Abbildung 2.2). Diese Vorgehensweise ist auch auf komplexere Geometrien erweiterbar.

Im Rahmen dieser Arbeit ist die Ladungsdichte ρ eines elektrischen Leiters in den seltensten Fällen bekannt; stattdessen wird die elektrische Spannung U angegeben. In diesem Fall muss ρ bestimmt werden, indem an der Oberfläche des Leiters ein Potential φ in der Höhe der bekannten Spannung vorgegeben und über den Zusammenhang $\varphi = \int \mathbf{E} \, d\mathbf{s}$ mit Gleichung 2.11 verknüpft wird. Für einen oder für zwei Linienleiter kann die jeweilige Ladungsdichte auf analytischem Wege ermittelt werden; dasselbe gilt für drei Linienleiter, wobei in diesem Fall bereits ein erheblicher Aufwand

zu treiben ist. Bei einer beliebigen Anzahl n von Leitern muss auf numerische Lösungsverfahren zurückgegriffen werden ([3] S. 309).

Im Falle der magnetischen Flussdichte stellen sich die mathematischen Verhältnisse beim Auftreten mehrerer Leiter mit verschiedenen Stromstärken einfacher dar. Analog zum in Gleichung 2.9 dargestellten Zusammenhang kann für ein differentielles Leiterstück dessen Beitrag zur magnetischen Flussdichte an einem bestimmten Punkt im Raum angegeben werden (differentielles Biot-Savart-Gesetz). Um die gesamte magnetische Flussdichte an einem Punkt zu erhalten, müssen die Beiträge aller Leiterstücke aufsummiert werden. Auf diese Weise ist die Betrachtung beliebiger Stromverteilungen möglich ([4] S. 199).

2.2 Rechengenauigkeit und mögliche Störeinflüsse

Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, stellt unter praktischen Bedingungen die numerische Berechnung elektrischer Felder und magnetischer Flussdichten die einzig sinnvolle Vorgehensweise dar. Während die dargestellten mathematischen Verfahren bei analytischer Anwendung exakt sind, können bei numerischen Berechnungen Fehler entstehen. Auch die Art und Weise der Modellierung der betrachteten Geometrie hat Einfluss auf die Genauigkeit des Ergebnisses. Schließlich ist eine Beeinflussung insbesondere des elektrischen Feldes durch Fremdkörper denkbar. Auf diese Effekte soll im Rahmen dieses Abschnitts genauer eingegangen werden.

2.2.1 Numerische und modellierungstechnische Effekte

Numerische Rechenverfahren können nur mit einer endlichen Rechengenauigkeit arbeiten. Zwar kann diese Genauigkeit auf Kosten der Geschwindigkeit gesteigert werden, doch gibt es insbesondere beim Ersatzladungsverfahren einen Rechenschritt, der unter ungünstigen Umständen eine starke Reduzierung der geltenden Ziffern und damit der Genauigkeit mit sich bringen kann, nämlich die Berechnung der unbekannten Ladungsdichten aus den bekannten Potentialen (Randwertproblem). Dies soll im Folgenden am Beispiel punktförmiger Ladungen erläutert werden, da bei diesen die Potentialkoeffizienten eine übersichtlichere Form haben als bei Linienleitern.

Gegeben sei eine Geometrie mit n leitfähigen, voneinander isolierten Elektroden unterschiedlicher Potentiale. Auf jeder Elektrode wird ein Aufpunkt platziert, der das Potential der jeweiligen Elektrode aufweist. Diese Aufpunkte werden mit dem Index i von 1 bis n durchnummeriert. In den Elektroden werden n punktförmige Ersatzladungen platziert, die mit dem Index j ebenfalls von 1 bis n durchnummeriert werden. Die Ladungsmengen Q_j der einzelnen Ersatzladungen sind anfangs unbekannt. Bekanntlich gilt für das von der Punktladung mit dem Index j ausgehende Potential φ_{ij} am Aufpunkt i der in Gleichung 2.12 dargestellte Zusammenhang, wobei r_{ij} den Abstand zwischen der Punktladung und dem Aufpunkt angibt. Verkürzt lässt sich dies mit dem sogenannten Potentialkoeffizienten p_{ij} schreiben ([1] S. 239).

$$\varphi_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon r_{ij}} Q_j = p_{ij} Q_j \quad (2.12)$$

Auf die Potentiale kann das Superpositionsprinzip angewendet werden, was bedeutet, dass sich das gesamte Potential an einem Aufpunkt durch die Addition der Einzelpotentiale der Ersatzladungen an demselben Punkt ergibt [1]:

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^n Q_j p_{ij} \quad (2.13)$$

Dies lässt sich in ein Gleichungssystem für alle Aufpunkte zusammenfassen [1]:

$$\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & \dots & \dots & p_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_n \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Klassisch könnte nun der unbekannte Vektor der Ladungen in Gleichung 2.14 berechnet werden, indem die invertierte Matrix der Potentialkoeffizienten mit dem Vektor der Potentiale multipliziert wird [1]. Erst mit den bekannten Ladungen könnte die elektrische Feldstärke an einem beliebigen Punkt im Raum ermittelt werden. Allerdings ist die Inversion einer Matrix, abgesehen vom damit verbundenen Rechenaufwand, mit einer geringen numerischen Stabilität verbunden, kann also unter Umständen eine deutliche Verringerung der Genauigkeit der Berechnung mit sich bringen. Dieses Problem kann durch die geschickte Wahl eines besser geeigneten Lösungsverfahrens für das Gleichungssystem gemildert werden. Ferner ist beim Ersatzladungsverfahren die Genauigkeit des Ergebnisses von der geschickten Wahl der Anzahl und der Platzierung der Ersatzladungen abhängig. Insgesamt ist damit beim Ersatzladungsverfahren die Qualität der programmiertechnischen Umsetzung für die Genauigkeit der errechneten Ergebnisse mindestens genauso wichtig wie die numerische Genauigkeit. Im Gegensatz dazu kann beim Biot-Savart-Verfahren die von einem einzelnen Leiterstück ausgehende Flussdichte unmittelbar aus dem darin fließenden Strom berechnet werden (siehe Gleichung 2.9), wobei sich auch hier die gesamte Flussdichte an einem Ort durch die Superposition der Flussdichtebeiträge der Teilleiter ergibt.

Neben diesen mathematischen Effekten kann sich auch aus der Modellierung der zu berechnenden Struktur eine Abweichung zwischen exakter analytischer und numerischer Lösung ergeben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für die numerische Berechnung gebogene Leiterstrukturen, wie sie beispielsweise innerhalb von Transformatoren oder bei Biegungen von Kabeln auftreten, in viele kurze gerade Leiterstücke zerlegt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird für die niederfrequenten Feldberechnungen das Programm „Win-Field“ der Forschungsgesellschaft für Energie und Umwelttechnologie mbH, Berlin, in der Version 2019 genutzt, das sich im niederfrequenten Bereich auf das Biot-Savart-Gesetz bzw. auf das Ersatzladungsverfahren stützt. Dieses Programm stellt nach Erfahrung des Verfassers die in Deutschland mit Abstand am weitesten verbreitete Lösung zur Feldberechnung im niederfrequenten Bereich dar. Der Hersteller schreibt zur Genauigkeit des Programms:

„Der Fehler der Feldberechnung an geraden Leitern beim bestimmungsgemäßen Einsatz der Software ohne die Berücksichtigung von Störeinflüssen durch Bebauung, Bewuchs oder ferromagnetische

Materialien etc. beträgt für die magnetische Flußdichte 0.00001% und für die elektrische Feldstärke 0.0001%. [...] Werden segmentierte Elemente wie z.B. kreis- oder spulenförmige Strukturen verwendet, erhöht sich der geometrische Fehler entsprechend der Fehlerdokumentation im Benutzerhandbuch. In der vordefinierten Standardeinstellung beträgt der Berechnungsfehler der magnetischen Flußdichte, der magnetischen und elektrischen Feldstärke, der Leistungsflußdichte sowie des Schallpegels, für die in der Software Dokumentation vorgesehenen Anlagenarten und Betrachtungsfälle ohne Störeinflüsse, folglich maximal: maximaler Berechnungsfehler = 1.4%“.

Wenngleich die gemeinsame Aufführung unterschiedlicher physikalischer Größen wie der elektrischen Feldstärke, der magnetischen Flussdichte und des Schallpegels bei der Fehlerbetrachtung ohne weitere Begründung zweifelhaft erscheint, kann dennoch davon ausgegangen werden, dass der angegebene maximale Fehler von 1,4% für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Betrachtungen bedeutungslos ist. Für zweidimensionale, langgestreckte Geometrien wie Freileitungen und Erdkabel ist sogar, wie in der Herstellerbeschreibung erwähnt, eine wesentlich bessere Genauigkeit anzunehmen.

Für die Darstellung von Feldstärke- und Flussdichtequerschnitten werden, da sich die Wertebereiche über mehrere Größenordnungen erstrecken, im Rahmen dieser Arbeit logarithmische Diagramme genutzt. In manchen der Diagramme ist im Bereich sehr kleiner Werte die Grenze der Auflösung in Form treppenstufenartiger Abstufungen zu erkennen. Die gewählte Auflösung stellt einen Kompromiss aus Genauigkeit und Rechen- bzw. Darstellungsaufwand dar; die erwähnten gestuften Darstellungen im Bereich ohnehin sehr kleiner Werte werden dabei in Kauf genommen.

2.2.2 Beeinflussung des elektrischen Feldes durch Fremdkörper

Wie aus den Gleichungen 2.5 und 2.6 hervorgeht, können das elektrische Feld und die magnetische Flussdichte durch Stoffe in ihrer Umgebung beeinflusst werden. Im Falle des elektrischen Feldes ist dafür die relative Permittivität ϵ_r und im Falle der magnetischen Flussdichte die relative Permeabilität μ_r des Stoffs von Bedeutung. Die praktische Bedeutung der relativen Permittivität ist in der Umgebung von Betriebsmitteln des Verteilnetzes allerdings vernachlässigbar, da beinahe alle dort vorkommenden Strukturen wie der Erdboden, Bewuchs, Gebäude oder Zäune entweder metallisch sind oder über eine ausreichend hohe Restfeuchte verfügen, um über das durch sie vorgegebene Erdpotential eine (zumindest teilweise) Abschirmung des elektrischen Feldes zu bewirken (siehe Abschnitt 2.1). Dagegen sind Stoffe mit einer nennenswert vom Wert eins verschiedenen relativen Permeabilität in der Umgebung von Anlagen des Verteilnetzes bedeutend seltener und in der Regel nur bei Eisen- oder Stahlkonstruktionen zu finden, sodass sich die magnetische Flussdichte beispielsweise im Erdreich ungehindert ausbreiten kann. Auf die Wirkungsweise der Abschirmung der magnetischen Flussdichte wird in Abschnitt 2.3 genauer eingegangen.

Aufgrund der Vielzahl an möglichen Strukturen, die in der Umgebung von Anlagen des Verteilnetzes vorkommen können, wird im Rahmen dieser Arbeit stets der allgemeine Fall eines ebenen, leitfähigen Erdbodens ohne Fremdkörper wie Bewuchs oder Bebauung angenommen. Beispielhaft soll aber der Einfluss eines parallel zur Trassenachse einer 110-kV-Freileitung verlaufenden Metallzauns auf die elektrische Feldstärke betrachtet werden. Die Freileitung soll vom Typ Donau 74 sein, für deren Beschreibung auf den Abschnitt 3.1 verwiesen sei. Es wird ein Bodenabstand der untersten

Leiterseile von 7 m angenommen. Die Leiterseile haben einen Querschnitt von 380/50 mm² und das Erdseil von 97/48 mm² Al/St. Die Phasenbelegung nach der Nomenklatur von Abschnitt 3.1 lautet 123/123. Der Zaun besteht aus 2 m hohen Zaunpfählen, die in jeweils 2 m Abstand voneinander aufgestellt sind. Das Zaungitter wird durch waagrechte Leiter dargestellt, die in 20-cm-Schritten übereinander über die gesamte Höhe der Zaunpfähle angebracht sind und die parallel zur Trassenachse verlaufen. Die Zaunpfähle und das Gitter sind in WinField als Erdseile aus Stahl mit einem Querschnitt von jeweils 10 mm² und einer spezifischen Leitfähigkeit von $\sigma = 5 \cdot 10^6 \text{ 1}/\Omega\text{m}$ modelliert. Für den spezifischen elektrischen Widerstand des Erdbodens werden 50 Ωm angenommen. Ferner ist in WinField die automatische Berechnung von Induktionsströmen aktiviert, auch wenn dies bei der quasistatischen Betrachtung der elektrischen Verhältnisse keine Rolle spielt.

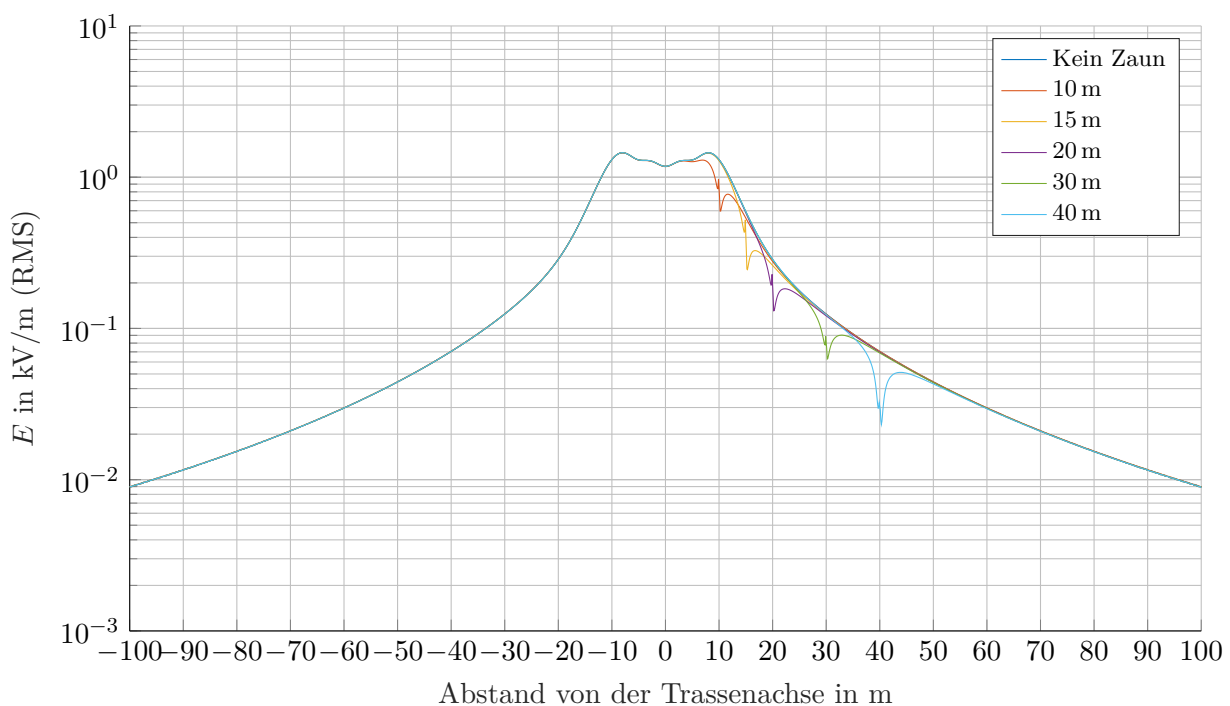


Abbildung 2.3: El. Feldstärke beim Masttyp Donau 74 mit Zaun in unterschiedlichen Abständen von der Trassenachse

Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 2.3 als Querschnitt in 1 m Höhe über dem Erdboden für unterschiedliche Abstände des Zauns von der Trassenachse dargestellt. Der Natur der Sache gemäß beträgt die elektrische Feldstärke auf Höhe des geerdeten Zauns genau 0 V/m, was allerdings in einem logarithmischen Diagramm schwer darzustellen ist und durch eine nur schwer sichtbare Lücke in den Graphen ersetzt wird. Es ist zu erkennen, dass in allen Fällen im Bereich wenige Meter beiderseits des Zauns eine deutliche Verringerung der elektrischen Feldstärke eintritt, während ansonsten die Feldstärke nicht von derjenigen ohne Zaun abweicht. Dies zeigt, dass eine offene, zweidimensionale Struktur wie die eines Zaunes nicht zur großräumigeren Abschirmung des elektrischen Feldes geeignet ist.

2.3 Wirkungsweise der Abschirmung von Magnetfeldern

Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, kommen in der Umgebung energietechnischer Anlagen des Verteilnetzes nur selten Objekte vor, die zu einer Abschirmung der magnetischen Flussdichte führen können. Geschieht dies doch einmal, kann die Abschirmung auf zweierlei physikalischer Grundlage geschehen, nämlich aufgrund der ferromagnetischen Schirmwirkung und/oder aufgrund der Abschirmung durch Induktion und Gegeninduktion. Beide Effekte sollen im Folgenden näher erläutert werden. Es ist anzumerken, dass das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Programm WinField nur die Induktionseffekte, nicht jedoch die ferromagnetische Schirmwirkung berücksichtigt¹.

2.3.1 Ferromagnetische Schirmwirkung

Die ferromagnetische Schirmwirkung beruht auf dem Prinzip der Brechung der Feldlinien der magnetischen Flussdichte an der Grenzfläche zwischen zwei Medien unterschiedlicher Permeabilität. Beim Übergang von einem Stoff niedrigerer Permeabilität, beispielsweise Luft, in einen Stoff höherer Permeabilität, beispielsweise Eisen, werden die Feldlinien zur Grenzfläche hin gebrochen. Dies liegt daran, dass an solchen Grenzflächen unterschiedliche Bedingungen für senkrecht zur Grenzfläche stehende (normale) und parallel zur Grenzfläche verlaufende (tangential) Feldanteile gelten: Während die Normalkomponente der elektrischen wie auch der magnetischen **Flussdichte** an Grenzflächen stetig ist, gilt dies bei den tangentialen Feldanteilen für die elektrische und die magnetische **Feldstärke**. Für die jeweils unstetigen Anteile der Feldstärken bzw. Flussdichten erfolgt eine Verstärkung bzw. Verringerung im Verhältnis der relativen Permeabilitäten bzw. Permittivitäten der Stoffe. Dies ist beispielhaft in Gleichung 2.15 für die Tangentialkomponenten der magnetischen Flussdichte in zwei Medien (Nr. 1 und 2) mit unterschiedlichen Permeabilitäten dargestellt. Bei gemeinsamer, vektorieller Betrachtung der normalen und tangentialen Flussdichteanteile liefert dies die Erklärung für den oben beschriebenen Brechungseffekt ([5] Abschnitt 2.1.6).

$$B_{t1} = \frac{\mu_1}{\mu_2} B_{t2} \quad (2.15)$$

Mithilfe dieses Brechungseffektes kann der magnetische Fluss in einem Material hoher relativer Permeabilität gebündelt werden – dieser Effekt ist beispielsweise bekannt vom Eisenkern bei Transformatoren. Der magnetische Fluss kann damit an einem zu schirmenden Ort vorbei oder um diesen herum geführt werden; in der Summe bleibt er jedoch gleich. Dies bedeutet, dass keine ferromagnetische Schirmwirkung eintritt, wenn sich die Quelle der magnetischen Flussdichte innerhalb eines geschlossenen Gehäuses hoher Permeabilität befindet, also beispielsweise bei einem stromführenden Kabel innerhalb eines Stahlrohres. Dies zeigt sich bei einem Blick auf die integrale Form des Durchflutungsgesetzes (Gleichung 2.8), demzufolge das geschlossene Ringintegral der magnetischen Flussdichte um den stromdurchflossenen Leiter herum in jedem Abstand alleine vom im Kabel fließenden Strom und von der Permeabilität am betrachteten Ort abhängig ist.

Ein Anwendungsbeispiel der ferromagnetischen Schirmwirkung bestand darin, Kathodenstrahlbildschirme, die nahe elektrifizierter Bahnlinien betrieben wurden, mit hochpermeablem Material zu

¹Herstellerinformation vom 3. April 2020.

ummanteln. Die von der Bahnlinie ausgehende niederfrequente magnetische Flussdichte wurde durch die Abschirmung um die Kathodenstrahlröhre herumgeführt, um eine Beeinflussung der magnetischen Ablenkung und damit Bildstörungen zu vermeiden.

2.3.2 Abschirmung durch Induktion und Gegeninduktion

Während der im obigen Abschnitt dargestellte Effekt der ferromagnetischen Abschirmung grundsätzlich unabhängig von der Frequenz des Magnetfeldes ist und folglich auch bei einem Gleichfeld auftreten würde, kommt die Schirmwirkung durch Induktion und Gegeninduktion nur bei Wechselfeldern zum Tragen. Das Grundprinzip besteht darin, dass ein Magnetfeld, sobald es in ein elektrisch leitfähiges Material gelangt, dort elektrische Wirbelfelder und in der unmittelbaren Folge kreisförmige Wirbelströme hervorruft. Diese Wirbelströme erzeugen ihrerseits Magnetfelder, die dem ursprünglich einwirkenden Magnetfeld entgegengerichtet sind – das sogenannte Rückwirkungsfeld. Da sich den Wirbelströmen der ohmsche Widerstand des leitfähigen Materials entgegenstellt, wird dabei Feldenergie in Wärmeenergie umgewandelt. Dieser Effekt ist auch als Wirbelstromverlust bekannt und tritt beispielsweise auch in Transformatorkernen auf. Bei letzteren wird versucht, der Entstehung von Wirbelströmen durch einen geblechten Aufbau des Kerns entgegenzuwirken ([5] S. 102 f.). Aufgrund dieser Energieumwandlung wird hier, anders als bei der ferromagnetischen Schirmwirkung, die Summe des magnetischen Flusses tatsächlich verringert; die Abschirmungswirkung eines leitfähigen Gehäuses durch Induktion und Gegeninduktion ist damit grundsätzlich unabhängig davon, ob sich die Quelle der Flussdichte innerhalb oder außerhalb des Gehäuses befindet ([5] S. 85).

Den mathematischen Ausgangspunkt bilden das Induktionsgesetz (Gleichung 2.3) und das Durchflutungsgesetz (Gleichung 2.4). Bei ersterem soll gemäß Gleichung 2.6 anstelle der magnetischen Flussdichte B die magnetische Feldstärke H betrachtet werden; bei letzterem wird die Stromdichte j entsprechend Gleichung 2.7 durch die elektrische Feldstärke ausgedrückt. Während in elektrischen Leitern der Feldbeitrag der zeitlichen Ableitung der elektrischen Flussdichte (in Gleichung 2.4) grundsätzlich vernachlässigt werden kann, gilt dies nicht unbedingt für die zeitliche Ableitung der magnetischen Feldstärke bzw. Flussdichte (siehe Gleichung 2.3). Letztere wird daher beibehalten ([1] Kapitel 6). Man spricht nun von quasistationären Feldern, wobei auch in diesem Fall keine Strahlung und damit keine Wellenausbreitung auftritt ([2] S. 111 f.). Es ergeben sich die Gleichungen 2.16 und 2.17.

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.16)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.17)$$

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Magnetfelder sind, genau wie die sie hervorruhenden Ströme, netzfrequent und sinusförmig („harmonisch“); weiterhin sind die Anlagen des Verteilnetzes mechanisch unbewegt. Liegt dazu die Stärke der magnetischen Flussdichte unterhalb der Sättigungsflussdichte des betrachteten Materials, handelt es um ein lineares, zeitinvariantes System, in dem alle Feldgrößen wie bei der komplexen Wechselstromrechnung durch Betrag und Phase ausgedrückt

werden können. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass die zeitliche Ableitung durch Multiplikation mit dem Faktor $j\omega$ ersetzt werden kann. Gleichung 2.16 lässt sich entsprechend vereinfachen:

$$\text{rot } \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (2.18)$$

Nun wird der Rotationsoperator erneut auf Gleichung 2.18 angewendet. Auf der rechten Seite der Gleichung kann der dabei entstehende Term $\text{rot } \mathbf{H}$ gemäß Gleichung 2.17 durch $\sigma\mathbf{E}$ ersetzt werden. Man erhält ([5] S. 106):

$$\text{rot rot } \mathbf{E} = -j\omega\mu\sigma\mathbf{E} \quad (2.19)$$

Da eine Abschirmung keine Spannungsquelle enthält und somit keine Ladungen in ihr vorhanden sind, handelt es sich bei allen in ihr entstehenden elektrischen Feldern um sogenannte quellenfreie Wirbelfelder, die ringförmige Wirbelströme hervorrufen. Mathematisch lässt sich diese Eigenschaft durch die sogenannte Divergenzfreiheit $\text{div } \mathbf{E} = 0$ ausdrücken. Der allgemeine vektoranalytische Zusammenhang $\text{rot rot } \mathbf{E} = \text{grad div } \mathbf{E} - \Delta\mathbf{E}$ vereinfacht sich dadurch zu $\text{rot rot } \mathbf{E} = -\Delta\mathbf{E}$. Das Symbol Δ bezeichnet dabei den Laplace-Operator. Angewendet auf Gleichung 2.19 erhält man ([5] S. 107):

$$\Delta\mathbf{E} = j\omega\mu\sigma\mathbf{E} \quad (2.20)$$

Gleichung 2.20 erinnert sehr an die allgemeine Wellengleichung der Form $\Delta\mathbf{E} + k^2\mathbf{E} = 0$ mit $k = k_W = \sqrt{-j\omega\mu\sigma}$. Im Spezialfall der ungedämpften Welle im Freiraum gilt dagegen $k = k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$. Da $\sqrt{-j} = (1-j)/\sqrt{2}$, hat k_W im Gegensatz zum rein reellen k_0 sowohl einen reellen als auch einen imaginären Anteil. Die dadurch entstehenden Auswirkungen werden klar, wenn man beispielsweise die allgemeine Lösung der Wellengleichung in y-Richtung in kartesischen Koordinaten betrachtet (in [6] S. 203 f. analog für die magnetische Feldstärke):

$$E_y = Ae^{-jkx} + Be^{jkx} \quad (2.21)$$

Es fällt auf, dass die Exponenten der Exponentialfunktionen rein imaginär sind, solange k reell ist. Dies entspricht der bekannten, ungedämpften Welle. Hat k hingegen, wie hier der Fall, sowohl einen reellen als auch einen imaginären Anteil, teilen sich die Exponentialfunktionen in einen schwingenden und in einen exponentiell mit der Entfernung abklingenden Anteil auf.

Der exponentiell abklingende Anteil liefert die Erklärung dafür, wieso die elektrische Feldstärke in einem leitfähigen Medium mit zunehmender Eindringtiefe immer schwächer wird. Dieselbe Schirmwirkung gilt vermittels Gleichung 2.17 ebenso für die magnetische Feldstärke bzw. Flussdichte und ist auch als **Skin-** oder **Stromverdrängungs-Effekt** bekannt. In diesem Zusammenhang wird die Eindringtiefe oder Skintiefe δ_S definiert ([5] S. 108):

$$\delta_S = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} \quad (2.22)$$

Die Eindringtiefe gibt an, innerhalb welcher Strecke in einem Medium die Feldstärken auf das $1/e$ -fache ($\approx 0,37$) abgeklungen sind ([5] S. 108). Dabei hängt sie von der Frequenz des einwirkenden Feldes, von der magnetischen Permeabilität und von der elektrischen Leitfähigkeit ab. Nach der fünffachen Skintiefe beispielsweise wäre nur noch weniger als 1% der ursprünglichen Feldstärke vorhanden.

2.4 Ansätze zur Feldminimierung

Aus den in obigen Abschnitten dargestellten physikalischen Grundlagen ergeben sich mehrere Schlussfolgerungen:

- Im netzfrequenten Bereich sind elektrische Feldstärke und magnetische Flussdichte innerhalb von nichtleitenden Stoffen voneinander unabhängig. Erstere entsteht nur durch das Vorhandensein von Ladungen infolge des Anliegens einer elektrischen Spannung und letztere nur durch einen elektrischen Strom. Eine in Betrieb befindliche Freileitung erzeugt dadurch zwar fortwährend ein elektrisches Feld, aber erst dann auch eine magnetische Flussdichte, wenn auch Strom durch sie fließt.
- Elektrische Feldstärke und magnetische Flussdichte einzelner langgestreckter zylindrischer Leiter sind proportional zur anliegenden Spannung bzw. zum fließenden Strom und indirekt proportional zur Entfernung des betrachteten Punktes zum Leiter (vergleiche Gleichungen 2.11 und 2.9).
- Bei gemeinsamem Auftreten mehrerer Feldquellen addieren sich die einzelnen elektrischen Feldstärken bzw. magnetischen Flussdichten vektoriell.
- Durch bestimmte Stoffe im Feldraum kann die Feldstärke beeinflusst werden. Im Falle des elektrischen Feldes betrifft dies elektrisch leitfähige Materialien; im Falle der magnetischen Flussdichte solche Materialien mit $\mu_r > 1$ und ebenfalls elektrisch leitende Materialien (bei Wechselfeldern).

Daraus ergeben sich drei grundsätzliche Herangehensweisen zur Verringerung der Feldstärke an einem gegebenen Punkt:

1. Abstandsvergrößerung

Durch Vergrößerung des Abstandes zwischen Feldquelle und betrachtetem Ort lassen sich sowohl elektrische Feldstärke als auch magnetische Flussdichte verringern.

2. Kompensation

Bei Verteilnetzen in Deutschland werden in der Mittel- und Hochspannungsebene stets symmetrische Dreiphasenwechselstromsysteme („Drehstrom“) verwendet. Dabei treten drei Phasen auf, deren Spannungen und Ströme annähernd denselben Betrag aufweisen und in ihrem zeitlichen Verlauf um jeweils 120° versetzt sind. In der vektoriellen Addition erhält man damit die Summe Null. Derselbe Zusammenhang gilt grundsätzlich auch für die Feldstärken, wobei für eine vollständige Kompensation alle drei Phasenleiter auf einem Punkt zusammengefasst sein müssten. In der Praxis kann aber eine Verringerung der Feldstärke erreicht werden, in-

dem die Phasenleiter eines oder mehrerer Drehstromsysteme so angeordnet werden, dass sich die entstehenden Felder am betrachteten Ort möglichst gut gegenseitig auslöschen.

Weiterhin ist es denkbar, durch zusätzliche Kompensationsleiter zielgerichtet Felder zum Zwecke der Auslöschung zu erzeugen.

3. Abschirmung

Wie in den obigen Abschnitten gezeigt wurde, ist die Abschirmung des elektrischen Feldes durch eine auf Erdpotential liegende, elektrisch leitfähige Fläche möglich. In der Praxis genügen hierfür bereits die üblichen Baustoffe von Gebäuden. Die Abschirmung der magnetischen Flussdichte ist dagegen deutlich aufwendiger und kann nur durch den erheblichen Einsatz elektrisch und/oder magnetisch leitfähiger ($\mu_r > 1$) Materialien erreicht werden.

2.5 Elektrotechnische Festlegungen

Wie in Abschnitt 2.4 erwähnt, sind elektrische Energieversorgungsnetze in Deutschland in der Mittel- und in der Hochspannungsebene als Dreiphasenwechselstromsysteme ausgeführt. Der Neutraleiter wird dabei, von vereinzelt Ausnahmen über kurze Strecken abgesehen, weder bei Freileitungen noch bei Erdkabeln mitgeführt. Im Niederspannungsnetz, das nicht den Bestimmungen der 26. BImSchV unterliegt (siehe Abschnitt 2.7.1), ist dies dagegen stets der Fall. Im Rahmen dieser Arbeit wird, wie im energietechnischen Bereich üblich, zur Angabe der Spannungshöhe die Außenleiterspannung U_Δ (Spannung bei Dreieckschaltung) verwendet. Diese errechnet sich gemäß Gleichung 2.23 aus der Sternspannung U_* , wobei letztere meist der Leiter-Erde-Spannung entspricht. Die in Europa gängige Haushalts-Netzspannung von 230 V (Sternspannung) entspricht damit einer Dreiecksspannung von annähernd 400 V. Dementsprechend wird die Niederspannung auch als 0,4-kV-Spannungsebene bezeichnet.

$$U_\Delta = \sqrt{3}U_* \quad (2.23)$$

In Abbildung 2.4 sind U_Δ , U_* und der Strom I am Beispiel eines symmetrischen Verbrauchers dargestellt. Der Verbraucher kann dabei rein ohmscher, ohmsch-induktiver oder ohmsch-kapazitiver Natur sein. Im Interesse einer einfacheren Darstellung wird dabei auf die in der Energietechnik übliche Zeigerdarstellung verzichtet; es sind nur jeweils die Beträge der Spannungen und Ströme angegeben. Die Phasenlage zwischen Strom und Spannung und damit der Leistungsfaktor können im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der entkoppelten Betrachtung der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte außer Acht bleiben (siehe Abschnitt 2.4).

Aus dem grundsätzlichen Zusammenhang zwischen Strom, Spannung und elektrischer Leistung ergibt sich für die gesamte Scheinleistung des Verbrauchers das Produkt $S = 3U_*I$. Soll die Scheinleistung aus der Außenleiterspannung U_Δ berechnet werden, so kann mithilfe von Gleichung 2.23 umgeformt werden. Es ergibt sich der in Gleichung 2.24 dargestellte Zusammenhang, der allgemein für Leistungsberechnungen im Drehstromnetz gültig ist.

$$S = 3U_*I = 3\frac{U_\Delta}{\sqrt{3}}I = \sqrt{3}U_\Delta I \quad (2.24)$$

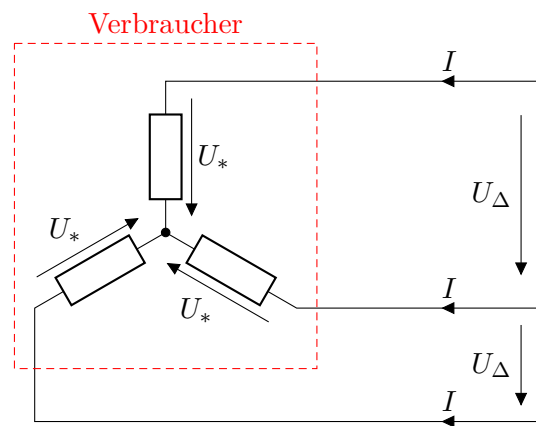


Abbildung 2.4: Spannungen und Ströme im Drehstromsystem

Die vorstehenden Feststellungen gelten nicht für Ein- oder Zweiphasensysteme, wie sie beispielsweise in Bahnstromnetzen vorkommen. Auf deren Besonderheiten wird in Abschnitt 6.1 genauer eingegangen.

2.6 Biologische Wirkungen elektrischer und magnetischer Felder

Die Wirkung elektrischer und magnetischer Felder auf den menschlichen Körper ist Gegenstand jahrzehntelanger Forschung. Verschiedene Behörden und internationale Expertengremien befassen sich mit der Sichtung und Bewertung der gewonnenen Forschungsergebnisse. In besonderer Weise tut sich hierbei die ICNIRP, die International Commission on non-ionizing radiation protection (Internationale Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung), hervor. Es handelt sich dabei um eine internationale und unabhängige wissenschaftliche Vereinigung, die es sich zur Aufgabe gemacht hat, den Kenntnisstand betreffend die Auswirkungen nichtionisierender Strahlung auf die menschliche Gesundheit und auf das menschliche Wohlbefinden zu bewerten und gegebenenfalls darauf basierend Grenzwerte zu empfehlen, die Schutz vor sämtlichen bekannten nachteiligen gesundheitlichen Auswirkungen bieten. Der von ICNIRP untersuchte Frequenzbereich der elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Felder erstreckt sich dabei von 0 Hz bis 300 GHz, umfasst also sämtliche im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Arten von Feldern [7].

Im Allgemeinen ist bei den gesundheitlichen Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder zu unterscheiden zwischen Kurzzeit- und Langzeiteffekten. Erstere treten unmittelbar nach einer kurzzeitigen Feldexposition auf und sind oftmals durch entsprechende Laborversuche feststellbar. Letzere können beispielsweise über epidemiologische Betrachtungen erkannt werden, also über den statistischen Vergleich unterschiedlich exponierter Bevölkerungsgruppen hinsichtlich des Auftretens bestimmter gesundheitlicher Effekte. Da die Feldexposition, die einzelne Personen im Verlauf ihres Lebens erfahren, oftmals nicht genau bestimmbar ist, stellt sich die Identifikation möglicher bisher nicht nachgewiesener Langzeiteffekte besonders aufwendig dar und ist mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Zudem können epidemiologische Studien zwar einen statistischen Zusammenhang zwischen Exposition und gesundheitlichen Effekten belegen, nicht jedoch

einen gegebenenfalls ursächlichen biologischen Wirkmechanismus. Ist ein solcher nicht feststellbar, so fehlt die Grundlage zur Festlegung eines Grenzwertes. Gegebenenfalls vorhandenen Unsicherheiten im Wissensstand wird mit der Verwendung von Reduktionsfaktoren begegnet, um dennoch einen Grenzwert unter Einhaltung des oben dargestellten Schutzziels angeben zu können [7].

Erstmals wurden von ICNIRP im Jahr 1998 auf diese Weise Grenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder von 0 bis 300 GHz festgelegt [8]. Später wurden Überarbeitungen getrennt für den niederfrequenten Bereich bis 100 kHz [9], dabei zugleich beinhaltend gewisse Vorgaben für den Bereich bis 10 MHz, und für den hochfrequenten Bereich von 100 kHz bis 300 GHz [10] veröffentlicht. Der Grund für diese getrennte Betrachtung liegt in den unterschiedlichen Wirkmechanismen. Es ist zu erwähnen, dass die durch ICNIRP empfohlenen Grenzwerte keine (indirekten) Effekte auf Metallprothesen oder implantierte Medizingeräte wie Herzschrittmacher, Defibrillatoren oder Cochleaimplantate berücksichtigen [9].

Aufgrund der Leitfähigkeit des menschlichen Körpers² ist das elektrische Feld im hier betrachteten Frequenzbereich von 0 Hz bis 100 kHz fast perfekt abgeschirmt. Durch die auftreffenden elektrischen Feldlinien werden oszillierende elektrische Ladungen in der Körperoberfläche influenziert, die hauptsächlich durch die Haare wahrgenommen werden und die bei zu großer Stärke ein Ärgernis darstellen können³. Demgegenüber entspricht die relative Permeabilität des Körpers derjenigen der umgebenden Luft, sodass die magnetische Flussdichte den Körper ungehindert durchdringen kann. Über das Induktionsgesetz (siehe Gleichung 2.3) sind auch hier Körperströme die Folge. Niederfrequente Magnetfelder können zentrales und peripheres Nervengewebe anregen, wobei das Hervorrufen von Lichtwahrnehmungen (Phosphenen) im Außenbereich des Gesichtsfeldes den herausragendsten Effekt darstellt. Bei allen genannten Effekten gibt es eine Feldstärkeschwelle, unterhalb derer sie nicht mehr auftreten und die deshalb, mit entsprechendem Reduktionsfaktor, als Grenzwert angesetzt werden kann. Im Bereich der Langzeiteffekte sind alleine einzelne Forschungsberichte von Bedeutung, die ein erhöhtes Risiko für das Auftreten von Leukämie im Kindesalter auch bei Exposition gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern weit unterhalb der geltenden Grenzwerte beschreiben. In Ermangelung eines zugrundeliegenden biophysikalischen Mechanismus und im Lichte tier- und zellexperimenteller Studien, die keine Anhaltspunkte für den beschriebenen Zusammenhang liefern, werden die Studien zu Leukämie im Kindesalter nicht bei der Grenzwertsetzung berücksichtigt [9].

Im Hochfrequenzbereich von 10 MHz bis 300 GHz müssen elektrische und magnetische Feldkomponente gemeinsam betrachtet werden. Bei Eindringen hochfrequenter elektromagnetischer Felder in den menschlichen Körper wird in erster Linie eine Erwärmung des Gewebes durch Absorption der Feldenergie hervorgerufen [10], auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden soll.

Eine Besonderheit stellt der Frequenzbereich von 100 kHz bis 10 MHz dar, in dem sowohl die oben genannten Niederfrequenz-Effekte durch Körperströme als auch die durch die hochfrequenten Felder hervorgerufenen Erwärmungseffekte auftreten. Dies ist insofern von Bedeutung, als es für die Grenzwerteinhaltung nicht nur auf die Frequenz der höchsten Feldstärke, sondern auf die Gesamtheit der

²Beispielsweise liegt die spezifische Leitfähigkeit von Rinder-Muskelgewebe bei einer Frequenz von 50 Hz bei etwa $0,21/\Omega\text{ m}$, wobei eine Übertragbarkeit auf menschliches Gewebe angenommen wird; für menschliche Haut wurde bei derselben Frequenz eine Leitfähigkeit von $0,3 \cdot 10^{-3} 1/\Omega\text{ m}$ gemessen [11].

³Private Kommunikation mit Prof. Dr. Achim Enders (Technische Universität Braunschweig / Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit).

für einen Wirkmechanismus bedeutsamen, einwirkenden Frequenzen ankommt. Für netzfrequente Felder bedeutet dies, dass bei der Prüfung der Grenzwerteinhaltung die Überlagerung sämtlicher vorhandener Felder von 1 Hz bis 10 MHz zu betrachten ist [9].

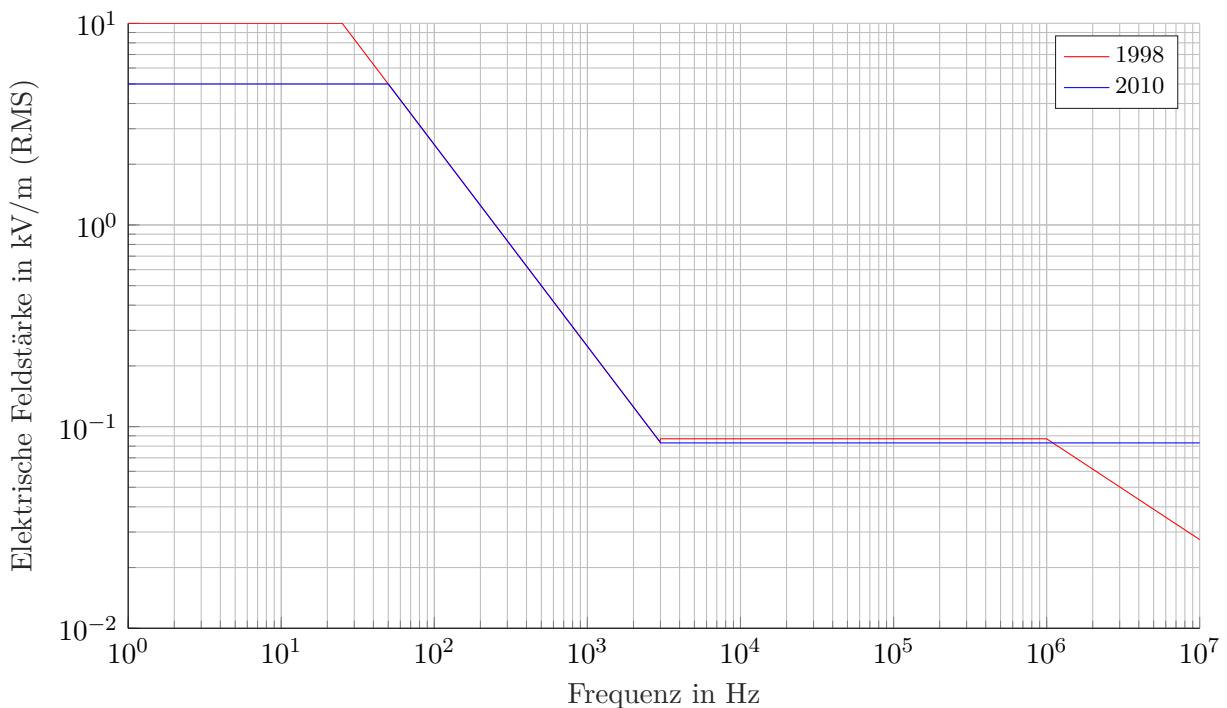


Abbildung 2.5: ICNIRP-Grenzwerte für die elektrische Feldstärke (Allgemeinbevölkerung) [8] [9]

In Abbildung 2.5 und 2.6 sind die durch ICNIRP festgelegten Grenzwerte der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte für die Allgemeinbevölkerung im Frequenzbereich von 1 Hz bis 10 MHz nach dem Stand von 1998 [8] und von 2010 [9] dargestellt. Daneben gibt es noch einen Satz höherer Grenzwerte für beruflich gegenüber Feldern exponierte Personen, die berücksichtigen, dass bei einer Exposition nur während der Arbeitszeit und aufgrund des anzunehmenden besseren Gesundheitszustands der beruflich exponierten Personen ein geringerer Reduktionsfaktor angesetzt werden kann [9]. Im Rahmen dieser Arbeit sollen nur die für die Allgemeinbevölkerung empfohlenen Grenzwerte betrachtet werden. Beim Vergleich der Festlegung aus den Jahren 1998 und 2010 fällt auf, dass die Grenzwerte für die elektrische Feldstärke weitgehend gleich geblieben sind, während die Grenzwerte für die magnetische Flussdichte in weiten Teilen des betrachteten Spektrums, darunter auch im netzfrequenten Bereich, erhöht wurden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für die Bestimmung der Grenzwerte im Jahr 2010 ein anatomisch detaillierteres Computermodell des menschlichen Körpers zur Verfügung stand [12].

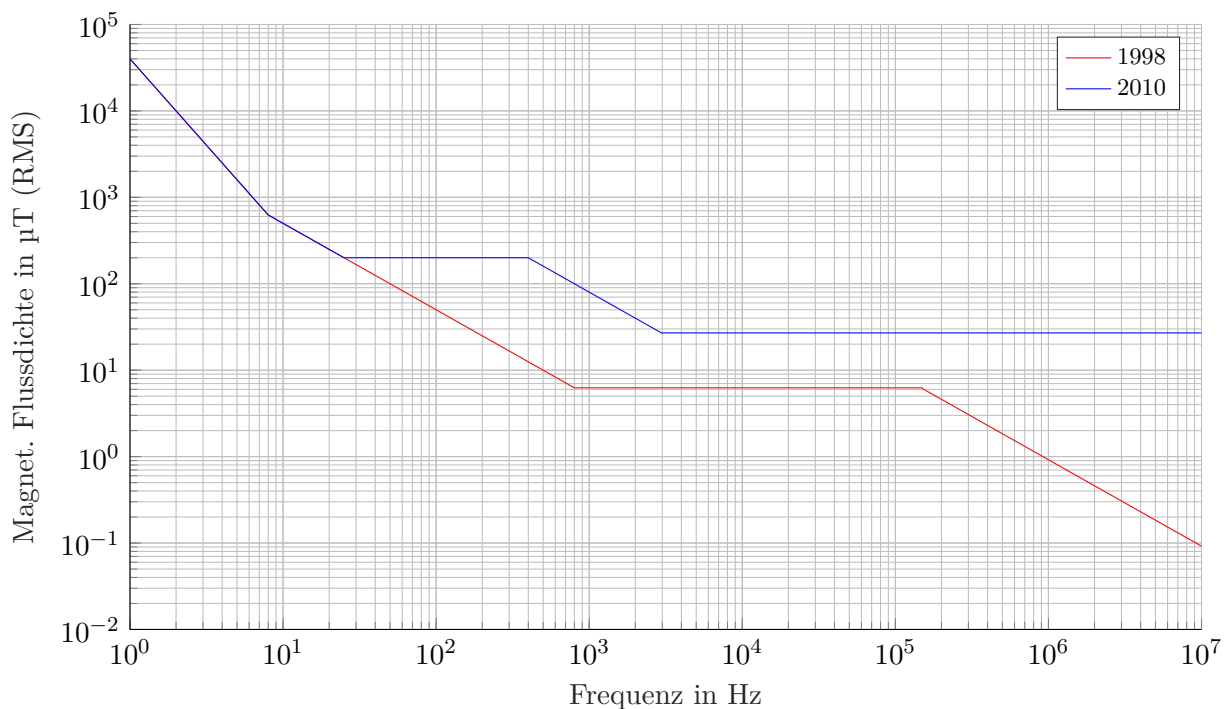


Abbildung 2.6: ICNIRP-Grenzwerte für die magnet. Flussdichte (Allgemeinbevölkerung) [8] [9]

2.7 Rechtliche Regelungen zu elektrischen und magnetischen Feldern in Deutschland

Ein Jahr nach deren Veröffentlichung wurden die von ICNIRP empfohlenen Grenzwerte durch die EG-Empfehlung 1999/519/EG „zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz - 300 GHz)“ übernommen [13]. Die EU-Staaten sind bei der Umsetzung dieser Empfehlung allerdings unterschiedlich verfahren. Einige Länder haben höhere oder gar keine Grenzwerte festgelegt, während andere Länder niedrigere Grenzwerte anwenden. Die Mehrheit der Länder hat aber die Empfehlung ohne oder nur mit geringen Anpassungen übernommen [14].

2.7.1 26. BImSchV

In Deutschland geschah die erstmalige Festlegung von Grenzwerten für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder im Bereich der Allgemeinbevölkerung durch die Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV), die zum 1. Januar 1997 in Kraft trat und die eine dreijährige Übergangsfrist für Bestandsanlagen vorsah. In ihrer ersten Fassung wies die 26. BImSchV für den Bereich von 10 MHz bis 300 GHz dieselben Grenzwerte auf, die später auch von der EG bzw. von der EU empfohlen wurden, während im Niederfrequenzbereich nur die Wertepaare für $16\frac{2}{3}$ Hz und 50 Hz entsprechend festgelegt wurden.

Im Jahr 2013 wurde die 26. BImSchV überarbeitet. In diesem Zuge wurde im Niederfrequenzbereich von 1 Hz bis 10 MHz eine durchgehende Grenzwerttabelle gemäß den im Jahr 2010 veröffentlichten Empfehlungen der ICNIRP eingefügt (siehe Abschnitt 2.6); außerdem wurde erstmals ein Grenzwert für magnetische Gleichfelder in Höhe von 500 μT vorgesehen, um auch den aufstrebenden Bereich der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) abzudecken⁴. Eine Ausnahme findet sich jedoch bei der Frequenz von 50 Hz: Abweichend von den überarbeiteten ICNIRP-Empfehlungen, die bei 50 Hz einen Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 200 μT vorsehen, wurde nur für diese Frequenz der alte Grenzwert von 100 μT beibehalten. Begründet wurde dies mit der „*Aufrechterhaltung des erreichten Schutzniveaus*“. Im Einklang mit den Festlegungen der ICNIRP wurde bestimmt, dass sämtliche elektrischen und magnetischen Feldstärken von 1 Hz bis 10 MHz in ihrer Überlagerung auf Einhaltung der Grenzwerte zu prüfen sind [16].

Die herausragendste formale Neuerung im Bereich der Niederfrequenzanlagen bestand darin, dass die Einhaltung der Feldstärkegrenzwerte alleine nicht mehr genügt; vielmehr sind bei Neuerrichtung und bei wesentlicher Änderung solcher Anlagen „*die Möglichkeiten auszuschöpfen, die von der jeweiligen Anlage ausgehenden elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Felder nach dem Stand der Technik unter Berücksichtigung von Gegebenheiten im Einwirkungsbereich zu minimieren*“ (§ 4 Abs. 2 der 26. BImSchV). Auf diese Anforderung wird in Abschnitt 2.7.2 genauer eingegangen. Die Einführung dieses Minimierungsgebots war politisch umstritten; es gelangte erst aufgrund der Intervention einiger Bundesländer über den Bundesrat im Vorfeld der Neufassung in die 26. BImSchV ([17] S. 95).

Zur Begründung der Einführung dieser Minimierungsvorschrift verweist die damalige Bundesregierung auf eine Empfehlung der Strahlenschutzkommission (SSK). Diese „*kommt zu dem Schluss, dass auch nach Bewertung der neueren wissenschaftlichen Literatur keine wissenschaftlichen Erkenntnisse in Hinblick auf mögliche Beeinträchtigungen der Gesundheit durch niederfrequente elektrische und magnetische Felder vorliegen, die ausreichend belastungsfähig wären, um eine Veränderung der bestehenden Grenzwertregelung der 26. BImSchV zu rechtfertigen. Aus der Analyse der vorliegenden wissenschaftlichen Literatur ergeben sich auch keine ausreichenden Belege, um zusätzliche verringerte Vorsorgewerte zu empfehlen, von denen ein quantifizierbarer gesundheitlicher Nutzen zu erwarten wäre. [...] Angesichts der bestehenden Unsicherheiten entspricht es jedoch den Grundsätzen des Strahlenschutzes, unnötige Expositionen zu vermeiden bzw. zu minimieren. [...] Bei Planung, Herstellung und Betrieb von ortsfesten Anlagen zur Energieversorgung sind Maßnahmen zu ergreifen, um Expositionen durch elektrische und magnetische Felder im Rahmen der technischen und wirtschaftlich sinnvollen Möglichkeiten zu minimieren*“ [15].

Weitere wichtige Punkte aus der 26. BImSchV sind:

- Im Bereich der Niederfrequenzanlagen umfasst die 26. BImSchV nur solche mit einer Nennspannung von 1 kV oder mehr (§ 1 Abs. 2 Nr. 2). Das Niederspannungsnetz unterliegt folglich nicht den Bestimmungen der 26. BImSchV.
- Im Falle der Niederfrequenzanlagen gelten die Grenzwerte nur an Orten, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind (§ 3 Abs. 1 und 2); bei Hochfre-

⁴Der gewählte Grenzwert in Höhe von 500 μT steht im Einklang mit der Empfehlung der Strahlenschutzkommission (SSK) zur Vermeidung von Störbeeinflussungen an elektronischen Implantaten ([15] S. 5 f.).

quenzanlagen dagegen an Orten, die zum dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind (§ 2 Abs. 1).

- Die 26. BImSchV beinhaltet gewisse Ausnahmeregeln für Anlagen, die vor dem 22. August 2013 errichtet worden sind (§ 3 Abs. 1). Dies bleibt im Rahmen dieser Arbeit außer Betracht, da hier der Neubau und die wesentliche Änderung von Anlagen betrachtet werden.
- Im Falle von Niederfrequenzanlagen mit einer Nennspannung von 110 kV oder mehr ist die Inbetriebnahme oder wesentliche Änderung der zuständigen Behörde mindestens zwei Wochen vorher anzuzeigen, sofern *„die Anlage auf einem Grundstück im Bereich eines Bebauungsplans oder innerhalb eines im Zusammenhang bebauten Ortsteils oder auf einem mit Wohngebäuden bebauten Grundstück im Außenbereich belegen ist oder derartige Grundstücke überquert“*, es sei denn, die Anlage oder ihre wesentliche Änderung bedürfen einer Genehmigung, Planfeststellung oder sonstigen behördlichen Entscheidung nach anderen Rechtsvorschriften, bei denen die Belange des Immissionsschutzes berücksichtigt werden (§ 7 Abs. 2). Im Falle der von diesen Vorschriften nicht abgedeckten Spannungsebenen hat der Betreiber die maßgebenden Daten vorzuhalten und der zuständigen Behörde auf Verlangen vorzulegen.
- In einer neuen Trasse errichtete 50-Hz-Freileitungen mit einer Nennspannung von 220 kV oder mehr dürfen *„Gebäude oder Gebäudeteile nicht überspannen, die zum dauerhaften Aufenthalt von Menschen bestimmt sind“*. Dies betrifft nur nach dem 22. August 2013 beantragte Planfeststellungs- und Plangenehmigungsverfahren (§ 4 Abs. 3).

2.7.2 26. BImSchVVwV

Die Minimierungsvorschrift nach § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV wurde mit der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV (26. BImSchVVwV) vom 26. Februar 2016 konkretisiert. Diese legt fest, dass bei Vorhandensein von Wohnungen, Krankenhäusern, Schulen, Kindergärten, Kinderhorten, Spielplätzen und allgemein von Gebäuden oder Gebäudeteilen, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind (sogenannte Minimierungsorte), innerhalb des Einwirkungsbereiches einer Anlage eine Minimierungsprüfung durchzuführen ist.

Der Einwirkungsbereich ist in Abschnitt 2.5 der 26. BImSchVVwV definiert als *„der Bereich, in dem die Anlage sich signifikant von den natürlichen und mittleren anthropogen bedingten Immissionen abhebende elektrische oder magnetische Felder verursacht, unabhängig davon, ob die Immissionen tatsächlich schädliche Umwelteinwirkungen auslösen. Im Niederfrequenzbereich wird die Hintergrundexposition dominiert durch die anthropogen vorkommenden Feldstärken, die im Wesentlichen durch die elektrische Hausinstallation und Elektrogeräte verursacht werden. In Deutschland beträgt die niederfrequente anthropogene Magnetfeldstärke im Mittel $0,1 \mu T$ und die elektrische Feldstärke weniger als $1 V/m$ “*. In Tabelle 2.1 ist die Ausdehnung des Einwirkungsbereichs für die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Anlagenarten aufgelistet.

Die Minimierungsprüfung besteht darin, dass die genannte Verwaltungsvorschrift für jede Anlage eine Reihe von Minimierungsmaßnahmen auflistet, die daraufhin zu prüfen sind, ob durch

Tabelle 2.1: Einwirkungsbereiche gemäß Abschnitt 3.2.1.2 der 26. BImSchVVwV und Abstände gemäß Abschnitt II.3.1 der LAI-Hinweise für ausgewählte Anlagenarten

Anlagenart	Einwirkungsbereich [m]	LAI-Hinweise [m]
Freileitung < 110 kV	100*	5*
Freileitung \geq 110 kV bis < 220 kV	200*	10*
Erdkabel < 50 kV	10**	1***
Erdkabel \geq 50 kV bis < 110 kV	25**	1***
Erdkabel \geq 110 kV bis < 220 kV	35**	1***
Ortsnetzumspannstation	10****	1****
Umspann- und Schaltanlage \leq 110 kV	50*****	5*****

*Abstand von der Bodenprojektion des ruhenden äußeren Leiterseils

**Abstand von der Bodenprojektion des äußeren Kabels

***Radius um das Kabel

****Abstand von der Einhausung

*****Abstand von der Eingrenzung

deren Ausführung eine Verringerung der Feldstärke an den oben genannten Orten zu erreichen ist. Dabei sind folgende Nebenbedingungen zu beachten:

- „Liegen mehrere maßgebliche Minimierungsorte innerhalb des Einwirkungsbereiches, werden bei der Minimierung alle maßgeblichen Minimierungsorte gleichrangig betrachtet. Eine Maßnahme kommt als Minimierungsmaßnahme nicht in Betracht, wenn sie zu einer Erhöhung der Immissionen an einem maßgeblichen Minimierungsort führen würde“ (Abschnitt 3.1).
- „Die Prüfung möglicher Minimierungsmaßnahmen erfolgt individuell für die geplante Anlage einschließlich ihrer geplanten Leistung und für die festgelegte Trasse. Das Minimierungsgebot verlangt keine Prüfung nach dem im Energiewirtschaftsrecht verankerten sogenannten NOVA-Prinzip – Netzoptimierung vor Netzverstärkung vor Netzausbau – und keine Alternativenprüfung, wie zum Beispiel Erdkabel statt Freileitung, alternative Trassenführung oder Standortalternativen, die nach den sonstigen Rechtsvorschriften, insbesondere nach dem Planfeststellungsrecht, erforderlich sein können“ (Abschnitt 3.1).
- „Es kann die Anwendung mehrerer Minimierungsmaßnahmen in Betracht kommen. Soweit deren gemeinsame Anwendung ausscheidet, ist eine Auswahl anhand der in dieser allgemeinen Verwaltungsvorschrift enthaltenen inhaltlichen Maßgaben zu treffen. Wirken sich eine oder mehrere Minimierungsmaßnahmen unterschiedlich auf das elektrische und das magnetische Feld aus, ist [...] für Niederfrequenzanlagen die Minimierung des magnetischen Feldes zu bevorzugen“ (Abschnitt 3.1).
- „Insbesondere ist der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit zu wahren, indem Aufwand und Nutzen möglicher Maßnahmen betrachtet werden. Zudem sind mögliche nachteilige Auswirkungen auf andere Schutzgüter zu berücksichtigen“ (Abschnitt 3.1).
- „Die Felder einer Anlage werden bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung in der überwiegend zu erwartenden Stromrichtungskonstellation als örtlicher Maximalwert außerhalb der Anlage ohne Berücksichtigung der Oberwellen [...] ermittelt“ (Abschnitt 4).

- Im Allgemeinen sind im Rahmen der Minimierungsprüfung die Feldstärken in einer Höhe von einem Meter über dem Boden zu betrachten, unabhängig davon, ob sich der betrachtete Punkt im Freien oder in einem Gebäude befindet. In beiden Fällen ist dieser Punkt in der Mitte des jeweiligen Minimierungsortes anzusetzen (Abschnitt 4).

2.7.3 Sonstige Vorschriften

Neben den vorgenannten Vorschriften gibt es noch die „Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI-Hinweise). Diese *„sollen den Vollzugsbehörden Erläuterungen und Empfehlungen mit dem Ziel geben, einen bundesweit einheitlichen Vollzug der 26. BImSchV zu erreichen“* [18]. Im Folgenden sind einige wichtige Punkte aus den LAI-Hinweisen aufgelistet.

- Die 26. BImSchV gilt nur für Anlagen mit einer Nennspannung von 1 kV oder mehr (siehe Abschnitt 2.7.1). Die LAI-Hinweise legen in Abschnitt II.1.3 fest, dass in Ortsnetzumspannstationen auch die Niederspannungssammelschiene mit ihrer Spannung von 0,4 kV als Bestandteil der Anlage zu sehen ist, also den Bestimmungen der 26. BImSchV unterliegt.
- In Abschnitt II.3.1 werden für verschiedene Arten von Niederfrequenzanlagen Abstände angegeben, außerhalb derer nicht mit einem relevanten Feldstärkebeitrag der jeweiligen Anlage zu rechnen ist und wo sich eine Prüfung auf Grenzwerteinhaltung deshalb erübrigt (siehe Tabelle 2.1).
- In Abschnitt II.3.3 wird die höchste betriebliche Anlagenauslastung konkretisiert. Diese *„ist durch eine technische Grenze charakterisiert. Bei Freileitungen und Erdkabeln sind dies der maximale betriebliche Dauerstrom sowie die Nennspannung und bei Elektroumspannanlagen die Nennleistung des Transformators. Der maximale betriebliche Dauerstrom einer Freileitung oder eines Erdkabels (für die jeweilige Leitung vom Betreiber zugelassen) wird festgelegt z. B. durch den thermisch maximal zulässigen Dauerstrom (z. B. Strombelastbarkeit nach DIN EN 50182), die maximal zulässige Übertragungsleistung oder die maximale Erzeugerleistung (z. B. mögliche Generatorleistung)“*.
- In Abschnitt II.3.4 wird das Verfahren zur Überprüfung der Grenzwerteinhaltung bei Überlagerung der Felder mehrerer Niederfrequenzanlagen bzw. von Niederfrequenzanlagen und Hochfrequenzanlagen zwischen 9 kHz und 10 MHz bestimmt. Im Falle von Hochfrequenzanlagen ist eine solche Prüfung nur innerhalb eines Abstandes von 300 m um die Hochfrequenzanlage herum durchzuführen, im Falle von Niederfrequenzanlagen nur dann, wenn der betrachtete Ort sich innerhalb der in Abschnitt II.3.1 festgelegten Abstände mehrerer Anlagen zugleich befindet.

Weiterhin werden von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz „Handlungsempfehlungen für EMF- und Schallgutachten zu Hoch- und Höchstspannungstrassen in Bundesfachplanungs-, Raumordnungs- und Planfeststellungsverfahren“ herausgegeben [19], die jedoch keine weitergehenden Festlegungen zur Minimierungsprüfung enthalten und die deshalb im Rahmen dieser Arbeit außer Acht bleiben sollen. Ebenso unbeachtet bleiben verschiedene berufsgenossenschaftliche und gesetzliche Vorschriften zum Arbeitsschutz in Bezug auf elektrische, magnetische

und elektromagnetische Felder. Im Rahmen dieser Arbeit sollen Feldstärken nur an solchen Orten betrachtet werden, die für die Allgemeinbevölkerung zugänglich sind.

Im Übrigen haben alle von der LAI verabschiedeten Hinweise nur innerhalb der Verwaltung Bindungswirkung, jedoch nicht für Außenstehende wie beispielsweise Netzbetreiber (siehe Abschnitt 5.1.1.4).

3 Wirksamkeit der Maßnahmen gemäß

26. BImSchVVwV

Die 26. BImSchVVwV listet in ihrem Abschnitt 5.3 eine Reihe von Maßnahmen zur Minimierung der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte auf, die beim Neubau oder bei der wesentlichen Änderung einer Energieübertragungsanlage mit 50 Hz zu prüfen sind. Im Einzelnen sind dies:

- Für **Freileitungen**:
 - Optimieren der Leiteranordnung,
 - Abstandsoptimierung,
 - Elektrische Schirmung,
 - Minimieren der Seilabstände und
 - Optimieren der Mastkopfgeometrie.
- Für **Erdkabel**:
 - Optimieren der Leiteranordnung,
 - Optimieren der Verlegetiefe,
 - Minimieren der Kabelabstände und
 - Optimieren der Verlegegeometrie.
- Für **Ortsnetzumspannstationen**:
 - Abstandsoptimierung,
 - Minimieren der Distanzen zwischen Betriebsmitteln mit unterschiedlicher Phasenbelegung und
 - Optimieren von Einspeisung und Abgängen der Niederspannungsverteilung.
- Für **Drehstromumspann- und Drehstromschaltanlagen ab Mittelspannung und höher, Umrichter- und Kompensationsanlagen**:
 - Minimieren der Distanzen zwischen Betriebsmitteln mit unterschiedlicher Phasenbelegung und
 - Abstandsoptimierung.

All diese Minimierungsmaßnahmen sollen im Folgenden auf ihre Wirksamkeit geprüft werden. Dabei soll auch angegeben werden, welche technischen Umstände der Verwirklichung einer Minimierungs-

maßnahme gegebenenfalls entgegenstehen und ob diese möglicherweise nachteilige Auswirkungen auf die Umgebung der Anlage hat.

3.1 Freileitungen

Im Mittelspannungsnetz, das in Deutschland typischerweise mit 10 oder 20 kV Nennspannung betrieben wird, ist der Anteil an Freileitungen rückläufig. Aus Gründen der Versorgungssicherheit sind die Netzbetreiber bestrebt, das Mittelspannungsnetz möglichst vollständig zu verkabeln; Neubauten von Freileitungen kommen in dieser Spannungsebene so gut wie nicht vor. Anders sieht dies in der Hochspannungsebene aus, die in Deutschland in aller Regel mit einer Nennspannung von 110 kV betrieben wird. Hier bieten Kabel gegenüber Freileitungen keinen Zuverlässigkeitsvorteil, dafür fällt ihr zusätzlicher Blindleistungsbedarf umso stärker ins Gewicht. Dies führt dazu, dass in der Hochspannung bevorzugt Freileitungen errichtet werden; eine Verkabelung kommt nur dann in Frage, wenn eine Freileitung aufgrund der örtlichen Verhältnisse (z.B. dichte Bebauung) oder aufgrund gesetzlicher Vorgaben ausscheidet.

Im Rahmen dieses Abschnitts sollen daher nur 110-kV-Freileitungen betrachtet werden. Außer Acht bleiben sollen auch Mitführungen von 110-kV-Stromkreisen auf Freileitungen des Höchstspannungsnetzes (220 bzw. 380 kV), da in diesen Fällen die Höchstspannungs-Stromkreise aufgrund ihrer höheren Spannung und ihres höheren Stromes bestimmend für die Feldstärken sind.

Zweissystemige, also aus zwei Stromkreisen und damit aus sechs Phasenleitern bestehende Anordnungen machen in Deutschland den größten Teil der 110-kV-Freileitungen aus. Daneben gibt es in geringerer Zahl einsystemige (drei Phasenleiter) und in Ausnahmefällen drei- und viersystemige Freileitungen (neun bzw. zwölf Phasenleiter). Letztere kommen insbesondere dann zum Einsatz, wenn in der Nähe von Umspannwerken viele Stromkreise gemeinsam zu führen sind und teilen sich meist nach relativ kurzer Länge auf ein- oder zweissystemige Leitungen auf.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen zwei Anordnungen aus dem Bereich der einsystemigen Leitungen betrachtet werden, und zwar die Einebene-Einsystem-Geometrie (Abbildung 3.1) und die Wetterfichten-Geometrie (Abbildung 3.2). In diesen Abbildungen ist die Einebene-Einsystem-Geometrie als Vollwandmast und die Wetterfichten-Geometrie als Stahlfachwerkmast dargestellt. In der Praxis können beide Geometrien in beiden Formen auftreten, was aber auf die magnetische Flussdichte keinen und auf die elektrische Feldstärke nur in unmittelbarer Mastnähe Einfluss hat. Bei den zweissystemigen Anordnungen sollen die Donau- (Abbildung 3.3), die Einebene-Zweissystem-⁵ (Abbildung 3.4), die Tonnen- (Abbildung 3.5) und die Tannen-Geometrie (Abbildung 3.6) untersucht werden. Schließlich kommen noch zwei viersystemige Anordnungen hinzu, nämlich zum einen eine Kombination aus Donau- und Einebene-Zweissystem-Geometrie (Abbildung 3.7) und zum anderen eine Einebene-Viersystem-Geometrie (Abbildung 3.8).

In allen Mastzeichnungen sind mit Kleinbuchstaben die relativen Abstände der Leiterseile zueinander angegeben, nicht jedoch deren Höhe über dem Erdboden. Dies geschieht aus zweierlei Gründen:

⁵Insbesondere auf dem Gebiet der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik existiert eine abweichende Bauform der Einebene-Zweissystem-Geometrie ohne Erdseilspitze. Da nach Erfahrung des Verfassers das Erdseil nur einen geringen Einfluss auf die Feldverteilung hat, wird eine Übertragbarkeit der im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse auf diese Bauform angenommen.

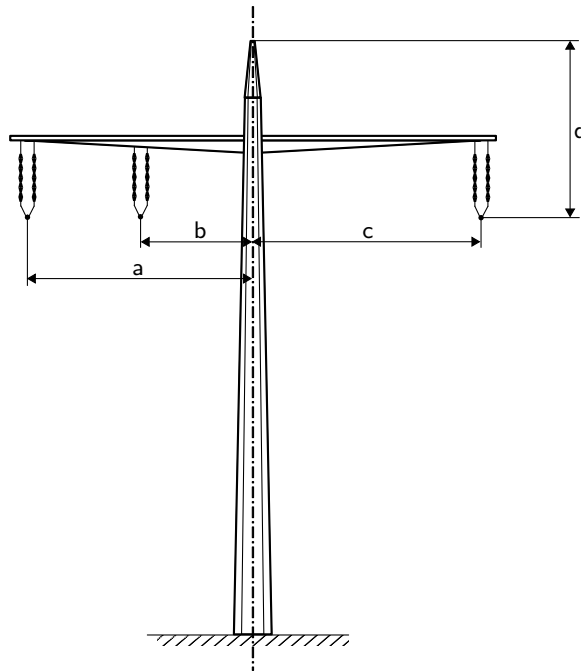


Abbildung 3.1: Einebene-Einsystem-Geometrie

Zum einen haben die Masten je nach Geländebeschaffenheit unterschiedliche Höhen und zum anderen sollen im Rahmen dieser Arbeit vor allem die Feldverhältnisse am Ort des größten Durchhangs der Leiterseile betrachtet werden. Solange keine außerordentlich großen Windstärken vorherrschen, ist die Mastgeometrie auch für die Anordnung der Leiterseile zueinander im Verlauf des Spannungsfeldes bestimmend. Die Höhe der Leiterseile über dem Erdboden wird in den folgenden Abschnitten gesondert angegeben. Die Maßangaben finden sich in den Tabellen 3.1 bis 3.7 und stellen typische Werte für die jeweilige Geometrie dar. Diese wurden freundlicherweise bereitgestellt von der Bayernwerk Netz GmbH, Regensburg. Da die Donau-Geometrie in weiten Teilen Deutschlands vorherrschend ist, werden hier zum Vergleich eine besonders kompakte, eine typische und eine besonders ausladende Anordnung betrachtet.

Die Großbuchstaben in den Mastzeichnungen dienen zur Kennzeichnung der einzelnen Phasenleiter und damit zur Angabe der Phasenanzahl. Diese erfolgt bei zweisystemigen Geometrien nach dem Muster ABC / DEF und bei viersystemigen Geometrien nach dem Muster ABC / DEF / GHI / JKL. Dasselbe gilt analog für das Vorzeichen der Stromflussrichtung. Beispielhaft für eine zweisystemige Anordnung wäre die Phasenanzahl 132 / 213 und die Stromflussrichtung --- / +++. Eine Ausnahme von dieser Regel stellen die einsystemigen Anordnungen dar, da dort die Phasenanzahl keinen Einfluss auf die Feldverteilung hat (siehe Abschnitt 3.1.1) und eine umgekehrte Stromflussrichtung im einzigen Drehstromsystem lediglich zu einer Spiegelung der Feldverteilung führt.

Tabelle 3.1: Maßangaben in m der einsystemigen Mastgeometrien

	a	b	c	d	e	f
Einebene-Einsystem 60	6,0	3,0	6,0	5,4		
Wetterfichte 43	4,3	3,8	3,3	2,0	4,0	10,6

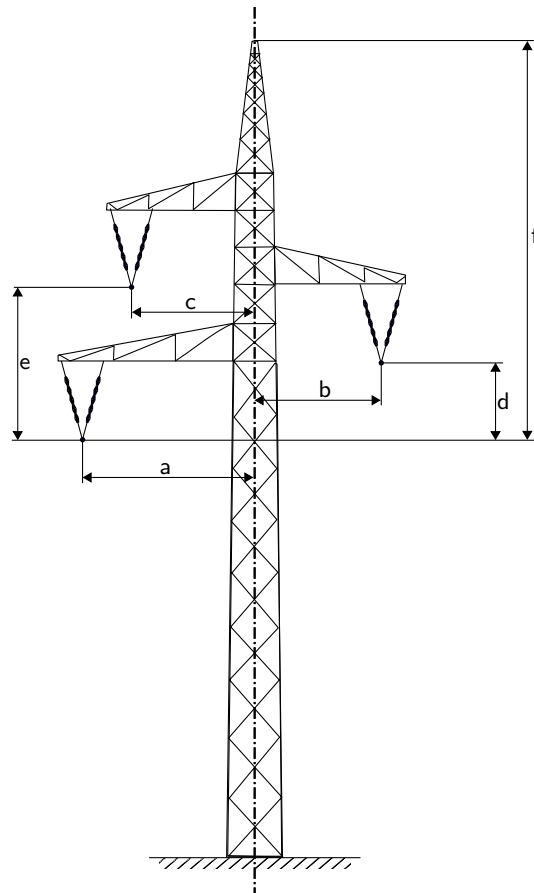


Abbildung 3.2: Wetterfichten-Geometrie

Tabelle 3.2: Maßangaben in m der Donau-Geometrien

	a	b	c	d	e
Donau 62	6,2	3,0	4,6	4,0	11,2
Donau 74	7,4	3,4	5,4	4,5	12,5
Donau 106	10,6	5,6	8,1	6,2	16,1

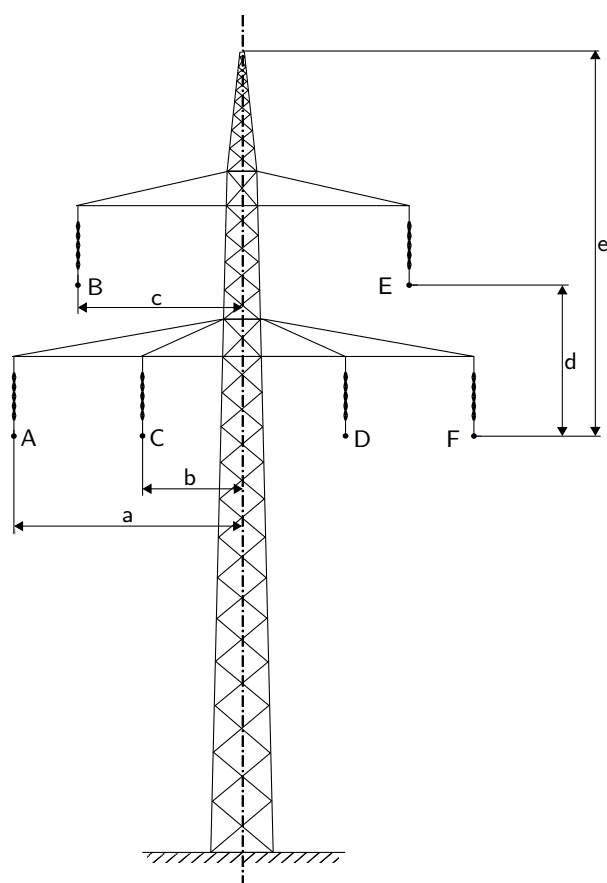


Abbildung 3.3: Donau-Geometrie

Tabelle 3.3: Maßangaben in m der Einebene-Zweissystem-Geometrie

	a	b	c	d
Einebene-Zweissystem 100	10,0	6,6	3,2	8,6

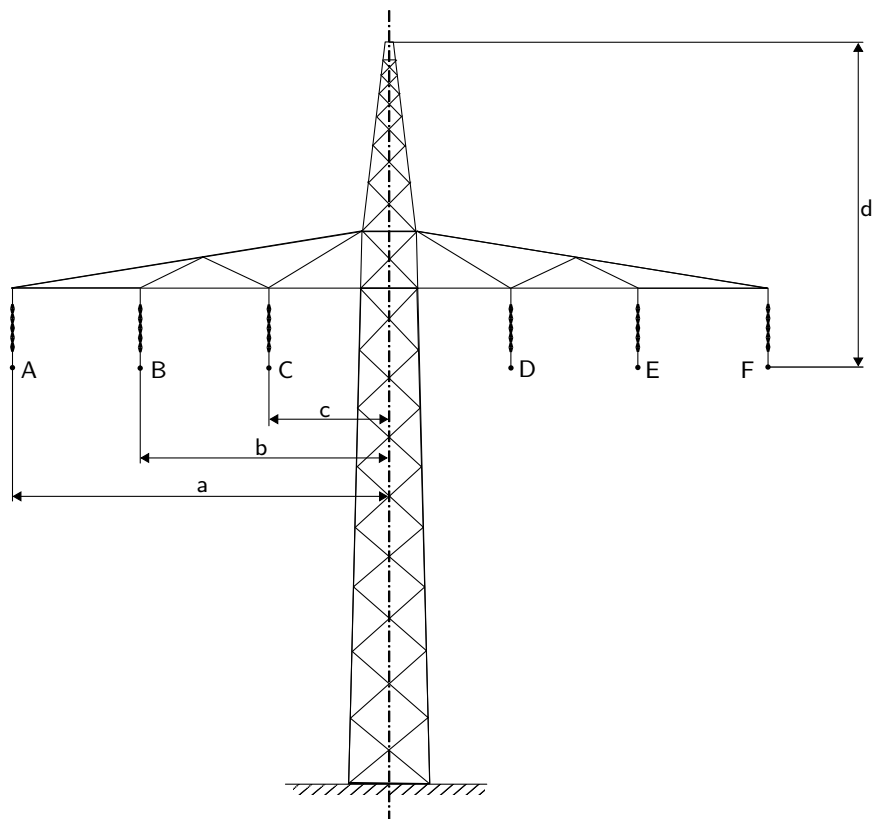


Abbildung 3.4: Einebene-Zweissystem-Geometrie

Tabelle 3.4: Maßangaben in m der Tonnen-Geometrie

	a	b	c	d	e	f
Tonne 30	3,0	4,5	3,0	4,5	9,0	16,0

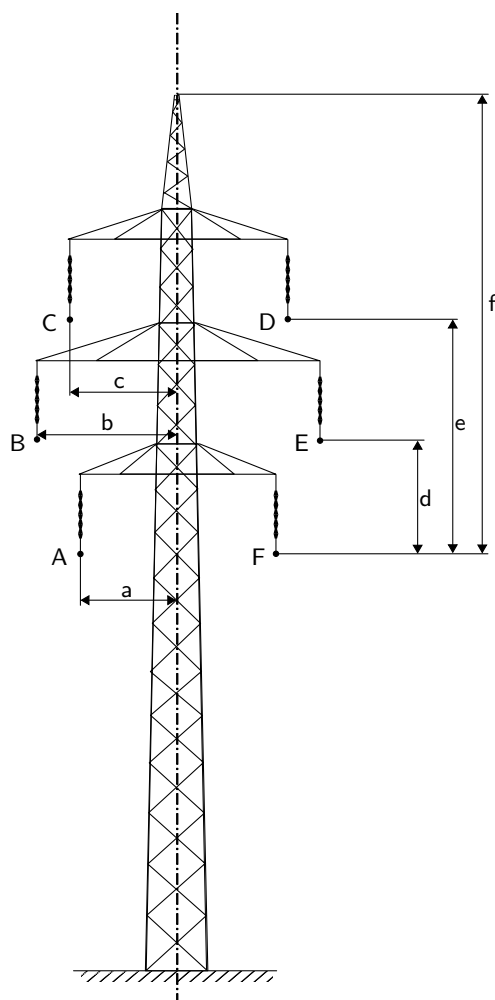


Abbildung 3.5: Tonnen-Geometrie

Tabelle 3.5: Maßangaben in m der Tannen-Geometrie

	a	b	c	d	e	f
Tanne 45	4,5	4,0	3,5	4,5	8,9	15,5

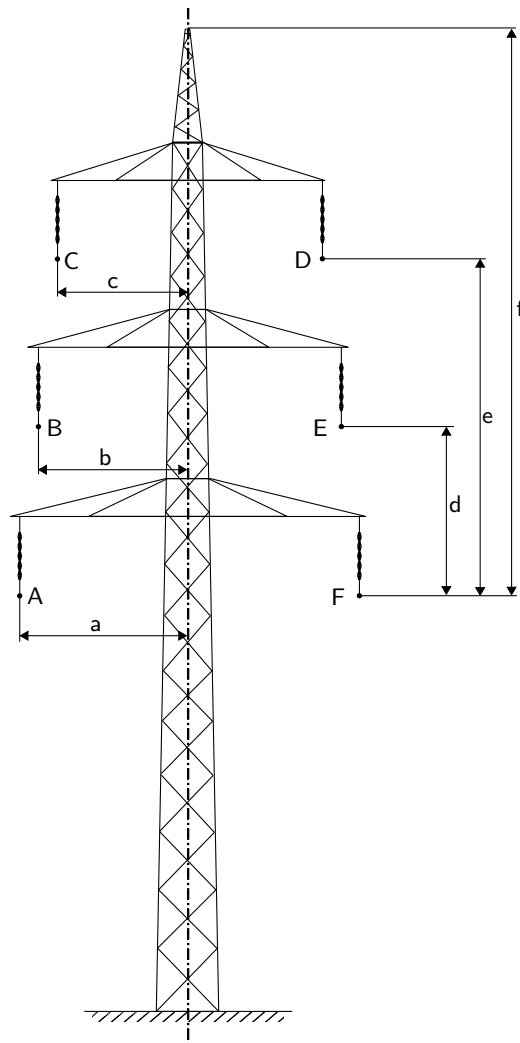


Abbildung 3.6: Tannen-Geometrie

Tabelle 3.6: Maßangaben in m der Einebene-Donau-Viersystem-Geometrie

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
Einebene-Donau-Viersystem 121	12,1	8,1	4,1	9,3	5,3	7,3	5,0	9,3	18,4

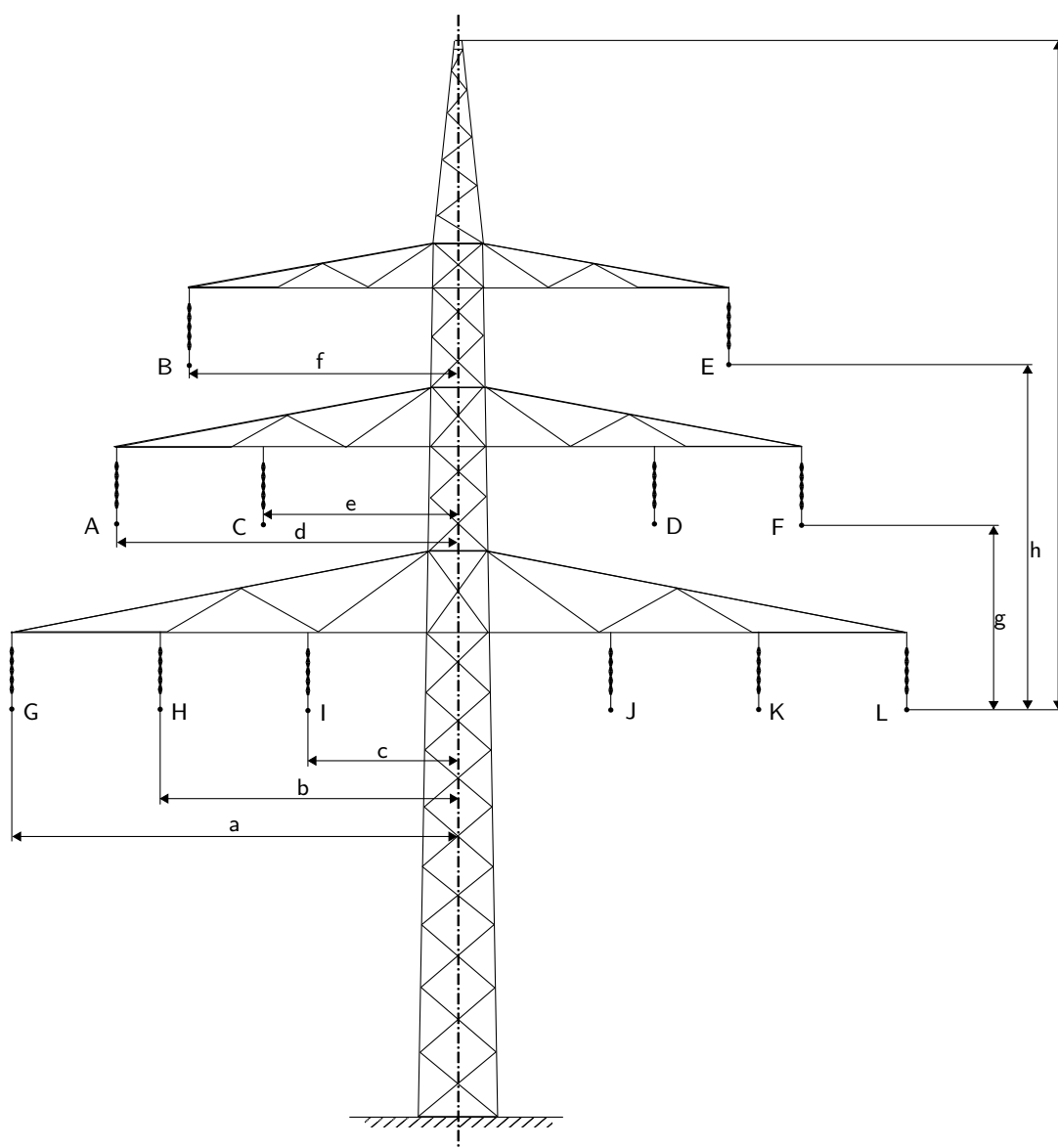


Abbildung 3.7: Einebene-Donau-Viersystem-Geometrie

Tabelle 3.7: Maßangaben in m der Einebene-Viersystem-Geometrie

	a	b	c	d	e	f	g	h
Einebene-Viersystem 102	10,2	7,1	4,0	9,3	6,2	3,1	4,6	10,5

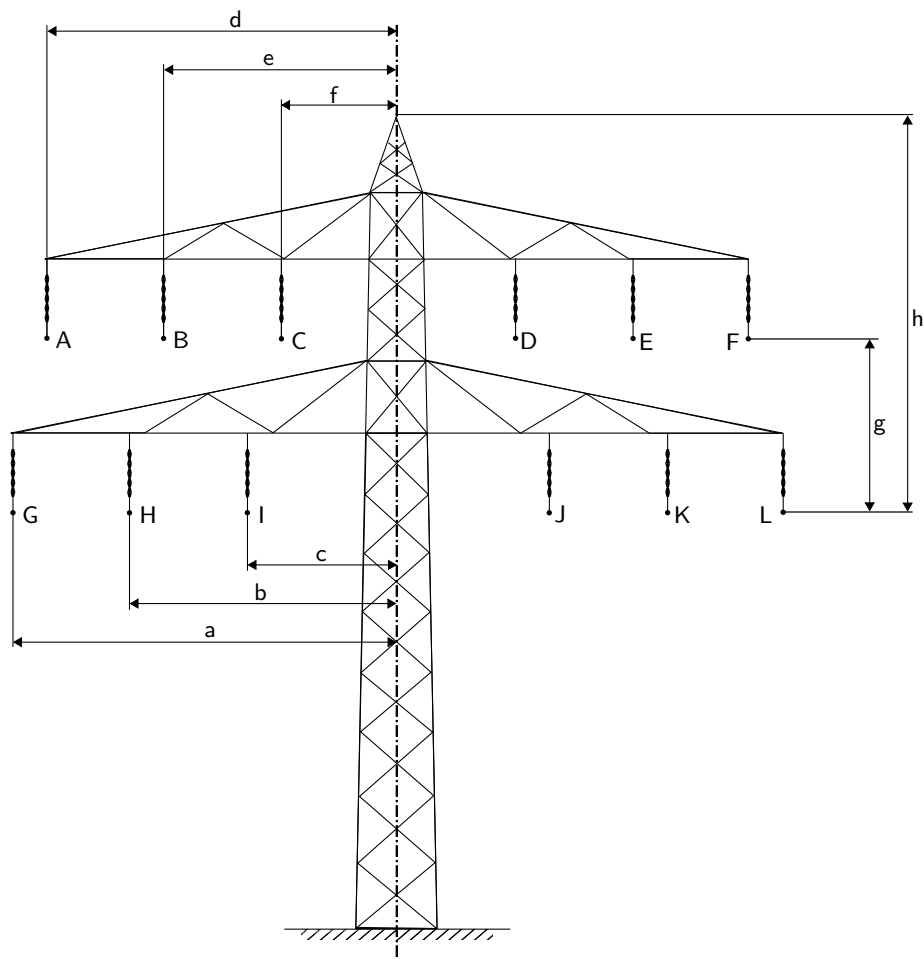


Abbildung 3.8: Einebene-Viersystem-Geometrie

3.1.1 Optimieren der Leiteranordnung

Die 26. BImSchVVwV schreibt zur Minimierung durch Optimieren der Leiteranordnung in ihrem Abschnitt 5.3.1.5:

„Bei einer vorgegebenen geometrischen Seilanordnung wird die Anschlussreihenfolge der Drehstromleiter an die Seile so gewählt, dass sich die von den einzelnen Leiterseilen ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder bestmöglich kompensieren.“

Voraussetzungen: Es muss mehr als ein Stromkreis auf dem Mast installiert sein. Bei Neubau kann die Maßnahme durchgeführt werden; bei wesentlicher Änderung ist sie möglich, wenn ein längerer Leitungsabschnitt oder die gesamte Leitung betroffen ist.

Wirksamkeit: Die Wirksamkeit ist hoch und wird von anderen Anlagenparametern, wie dem Mastkopfbild oder dem Leiterseilabstand beeinflusst. Geringe Leiterabstände erhöhen die Wirksamkeit. Zudem ist die relative Wirksamkeit abhängig vom Abstand zu den Leiterseilen. Sie ist vor allem im Einwirkungsbereich örtlich sehr unterschiedlich und kann punktuell deutlich schwanken.

Hinweise: Die optimale Leiteranordnung kann für das elektrische und magnetische Feld und für den Nah- und den Fernbereich unterschiedlich sein. Weil sie auch von den Lastflussrichtungen der Einzelsysteme abhängt, kann sich die Leitung nach einer Lastflussumkehr in einem Stromkreis in einem nicht optimierten Zustand befinden. Der zusätzliche Aufwand für eine neu zu bauenden [sic!] Leitung ist gering. In kurzen Leitungsabschnitten ist eine Änderung der Leiteranordnung meist mit einem erheblichen Aufwand verbunden“.

Diese Minimierungsmethode beruht auf dem physikalischen Prinzip der Kompensation elektrischer und magnetischer Felder (siehe Abschnitt 2.4). Zwar gibt es auch bei einsystemigen Freileitungen eine gegenseitige Überlagerung der Felder der drei Phasenleiter, doch führt dort eine Änderung der Phasenzuordnung zu den Leiterseilen lediglich zu einer zeitlichen Verschiebung des Feldstärkeverlaufs, während der Mittelwert unverändert bleibt. Diese Minimierungsmethode ist deshalb nur bei mehrsystemigen Freileitungen anwendbar, wie auch die 26. BImSchVVwV feststellt. Bei einer zweisystemigen Freileitung existieren innerhalb jedes Systems $3! = 6$ mögliche Zuordnungen der Phasen L1, L2 und L3 auf die drei Leiterseile; bei der gemeinsamen Betrachtung beider Systeme ergeben sich rechnerisch $6 \cdot 6 = 36$ mögliche Phasenzuordnungen.

Bauhofer hat im Jahr 1994 ein ausführliches Werk über die elektrischen und magnetischen Felder von Freileitungen veröffentlicht. Unter anderem geht daraus hervor, dass sich diese 36 Kombinationen tatsächlich in sechs Gruppen mit jeweils gleichen Feldverläufen einordnen lassen ([20] Abschnitt B S. 9). Bei Bauhofer wurde nur vom elektrischen Feld und von der magnetischen Flussdichte bei gleichsinnigem Stromfluss in den beiden Systemen ausgegangen, weshalb stichprobenartig für alle Phasenanordnungen eines der nach Bauhofer feldgleichen Sextette, nämlich 123 / 123, 132 / 132, 213 / 213, 231 / 231, 312 / 312 und 321 / 321, die magnetische Flussdichte als Querschnitt in 1 m Höhe über dem Boden für den Masttyp Einebene-Zweissystem 100 bei gegensinnigem Stromfluss berechnet wurde. Es zeigte sich, dass auch in diesem Fall die Flussdichteverläufe der sechs Phasenanordnungen übereinstimmen.

3.1.1.1 Modellierung der zweisystemigen Mastgeometrien

Diese sechs Möglichkeiten sollen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das elektrische Feld und auf die magnetische Flussdichte bei allen im Rahmen dieser Arbeit betrachteten zweisystemigen Mastgeometrien verglichen werden. Es wird dabei stets von einem Strom von 500 A und einer Außenleiter-Spannung von 110 kV ausgegangen. Damit sind, ebenso wie bei den Feldgrößen, die quadratischen Mittelwerte (RMS) gemeint. Es werden gemäß Abschnitt 4 der 26. BImSchVVwV die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte in 1 m Abstand über dem elektrisch leitenden Boden als Querschnitt durch die Trassenachse angegeben.

Für die Festlegung des Bodenabstands der Leiterseile wird auf die Norm DIN EN 50341 zurückgegriffen, die in ihrem Abschnitt 5.9 zum Schutz der Öffentlichkeit Mindestabstände zwischen Leiterseilen und dem Erdboden bzw. Objekten festlegt. In der 110-kV-Spannungsebene ist beispielsweise in einem Gelände ohne Hindernisse ein Bodenabstand von mindestens 6,0 m einzuhalten; über Gebäuden mit Flachdächern beträgt der Mindestabstand 5,0 m und über Straßen 7,0 m [21]. Da in offenem Gelände kaum mit maßgeblichen Minimierungsorten zu rechnen und auch die Überspannung von Wohngebäuden durch Freileitungen selten ist, wird der niedrigstmögliche Leiterseil-Bodenabstand über Straßen als Anhaltspunkt für bewohnte Gebiete herangezogen. Es wird daher im Folgenden von einem Bodenabstand der (untersten) Leiterseile von 7 m ausgegangen.

Der Querschnitt der Leiterseile beträgt $380/50 \text{ mm}^2$ Al/St und der des Erdseils an der Mastspitze $97/48 \text{ mm}^2$ Al/St. Der Querschnitt der Feldstärken wird im Interesse der Übersichtlichkeit für einen seitlichen Abstand von jeweils 100 m beiderseits der Trassenachse dargestellt, was etwas weniger als die Hälfte des gemäß Abschnitt 3.2.1.2 der 26. BImSchVVwV für 110-kV-Freileitungen vorgesehenen Einwirkungsbereichs darstellt. Es wird sich jedoch zeigen, dass bereits innerhalb dieses Abstands in den allermeisten Fällen die gemäß Abschnitt 2.5 der 26. BImSchVVwV in Deutschland allgemein vorherrschende Hintergrundflussdichte von $0,1 \text{ µT}$ unterschritten ist.

3.1.1.2 Lastflussumkehr infolge der Energiewende

Bis vor wenigen Jahren war die Lastflussrichtung im elektrischen Versorgungsnetz in Deutschland klar festgelegt: Die elektrische Energie wurde von den Kraftwerken erzeugt, die in der Regel in der Höchstspannungsebene angeschlossen waren. Von dort floss der Strom über die Hoch-, Mittel- und Niederspannungsebene zu den Verbrauchern. Diese Gewissheit hat sich im Zuge der Energiewende mit ihrem verstärkten Zubau an verteilten, kleinen Erzeugern aufgelöst. Photovoltaik- und Biomasseanlagen speisen in der Regel in das Nieder- oder Mittelspannungsnetz und Windparks in der Regel in das Mittel- oder Hochspannungsnetz ein. Zu Zeiten starker Sonneneinstrahlung und/oder hoher Windstärken wird von Photovoltaikanlagen und Windrädern oftmals mehr Leistung erzeugt, als im gesamten Versorgungsnetz benötigt wird. Die Lastflussrichtung im Netz kehrt sich dann um; die Leistung fließt vom Nieder- und Mittelspannungsnetz über das Hoch- in das Höchstspannungsnetz, wo sie überregional verteilt und gegebenenfalls in Nachbarländer exportiert wird. Im Falle nicht ganz so starker Einspeisung durch erneuerbare Energiequellen findet nur eine teilweise Umkehr der Lastflussrichtung statt: Insbesondere in ländlichen Gebieten mit geringer Verbraucher- und hoher Erzeugerdichte speisen die Mittelspannungsnetze Leistung in das Hochspannungsnetz ein, während vorwiegend städtische, verbrauchsgeprägte Mittelspannungsnetze Leistung aus dem

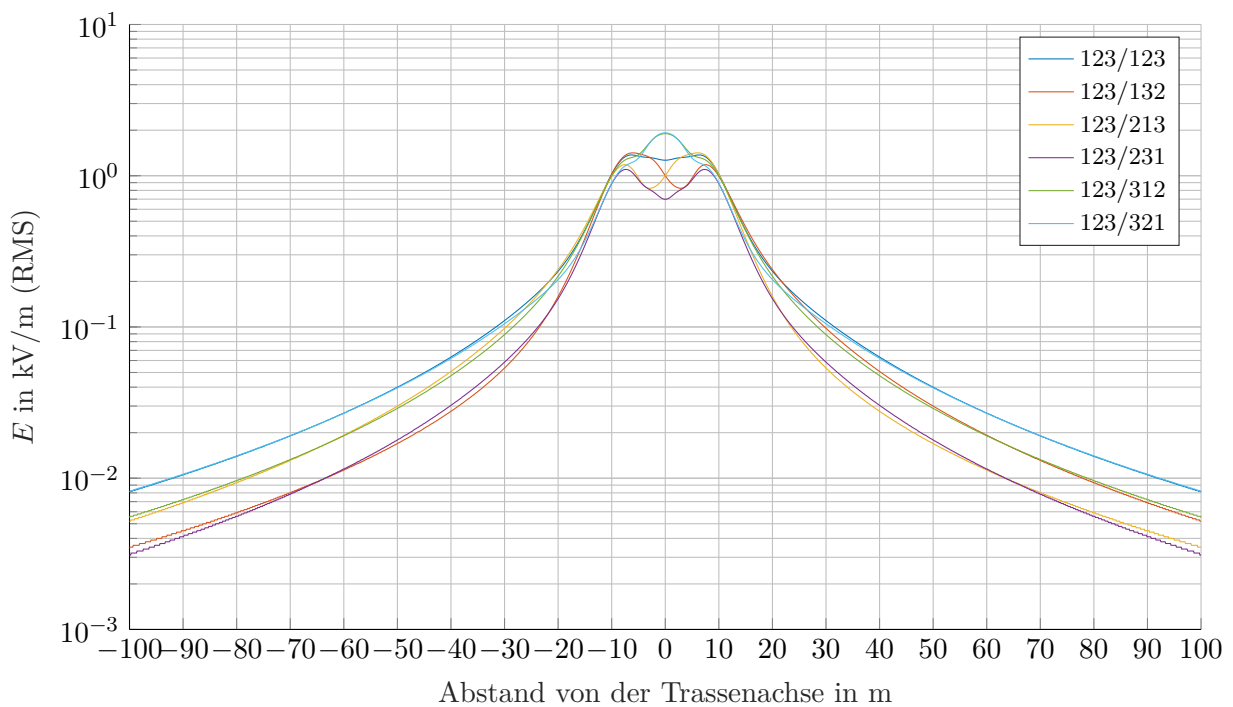


Abbildung 3.9: Elektrische Feldstärke beim Typ Donau 62 in Abhängigkeit von der Phasenanzordnung

Hochspannungsnetz beziehen. In diesem Fall sorgt das Hochspannungsnetz für einen Ausgleich, was zur Folge hat, dass dort der Stromfluss in einigen Systemen in klassischer Versorgungsrichtung orientiert ist, während er in anderen Systemen in entgegengesetzter Richtung läuft.

Zusammengenommen haben diese Effekte zur Folge, dass die Lastflussrichtung im 110-kV-Netz abhängig vom Wetter, von der Tages- und von der Jahreszeit sowie vom Wochentag ist – an Wochenenden und Feiertagen fallen schließlich viele Industrie- und Gewerbetunden als Verbraucher weg. Eine überwiegend zu erwartende Stromrichtungskonstellation, die gemäß Abschnitt 4 der 26. BImSchV-VwV bei der Feldminimierung zugrunde gelegt werden soll, existiert nur noch in seltenen Fällen. Es soll deshalb die magnetische Flussdichte sowohl bei gleichsinnigem als auch bei gegensinnigem Stromfluss (--- / +++) in beiden Systemen betrachtet werden. Die elektrische Feldstärke bleibt hiervon unberührt, da sie lediglich von der anliegenden Spannung abhängt.

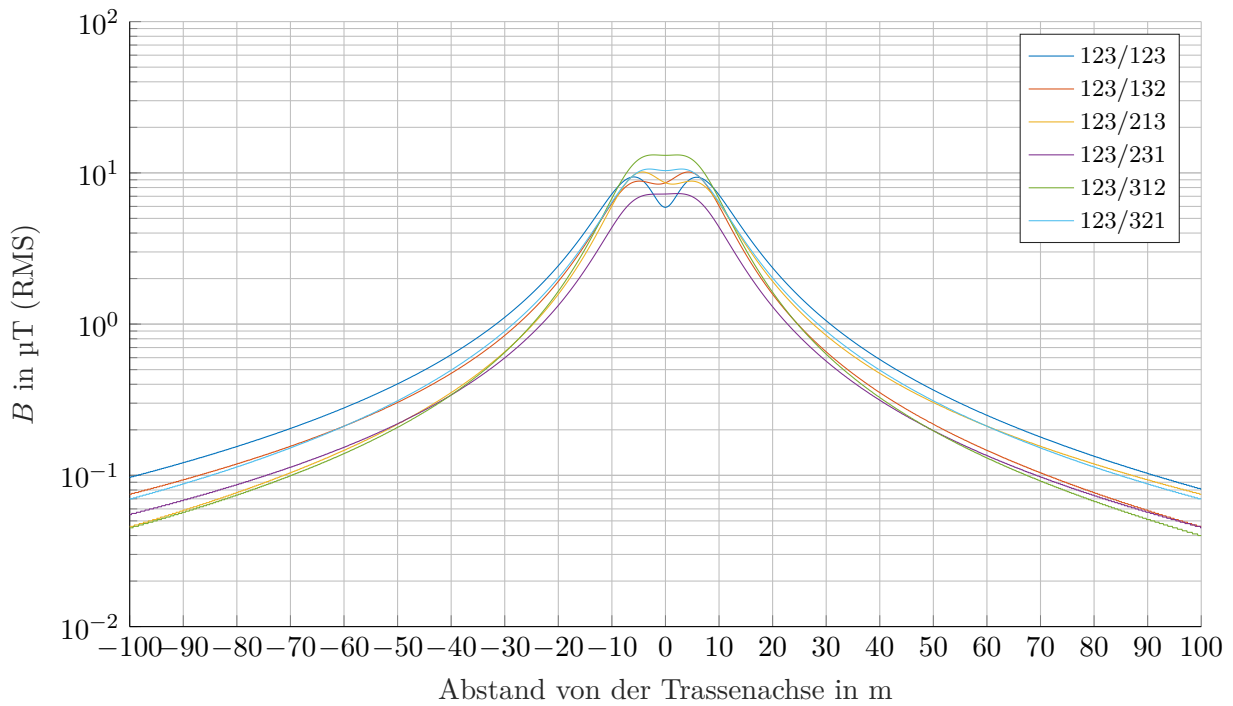


Abbildung 3.10: Magnetische Flussdichte beim Typ Donau 62 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

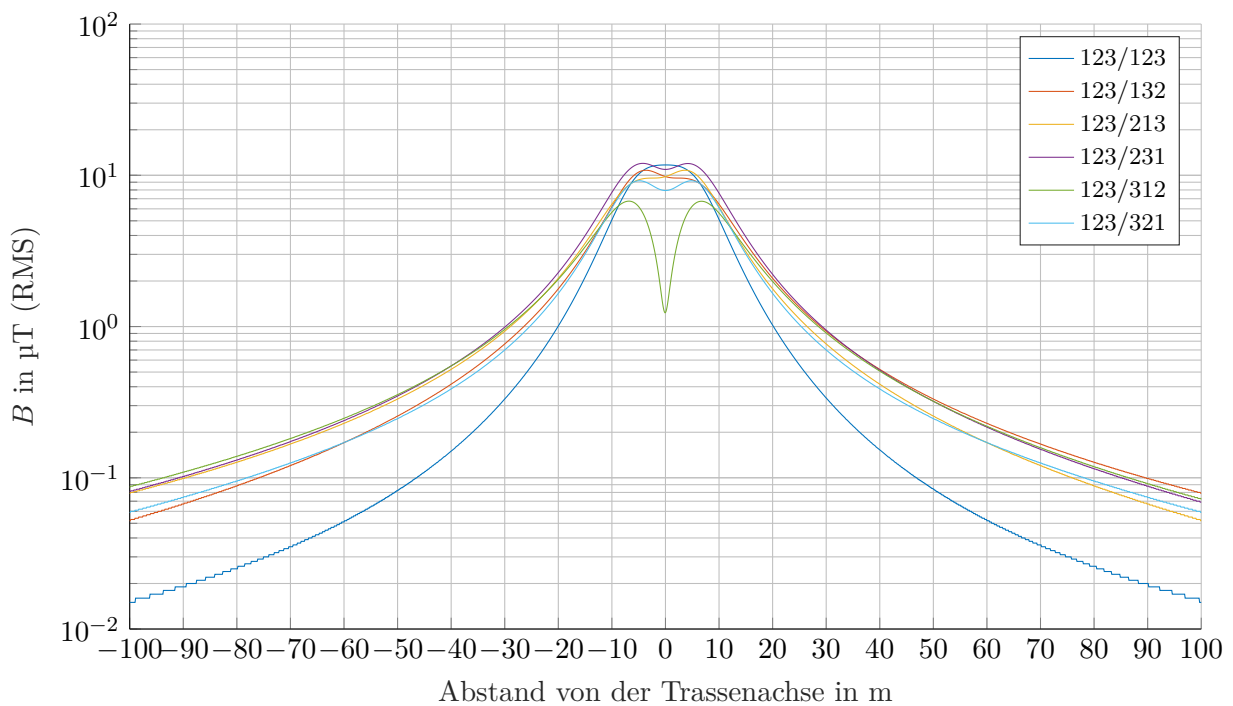


Abbildung 3.11: Magnetische Flussdichte beim Typ Donau 62 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

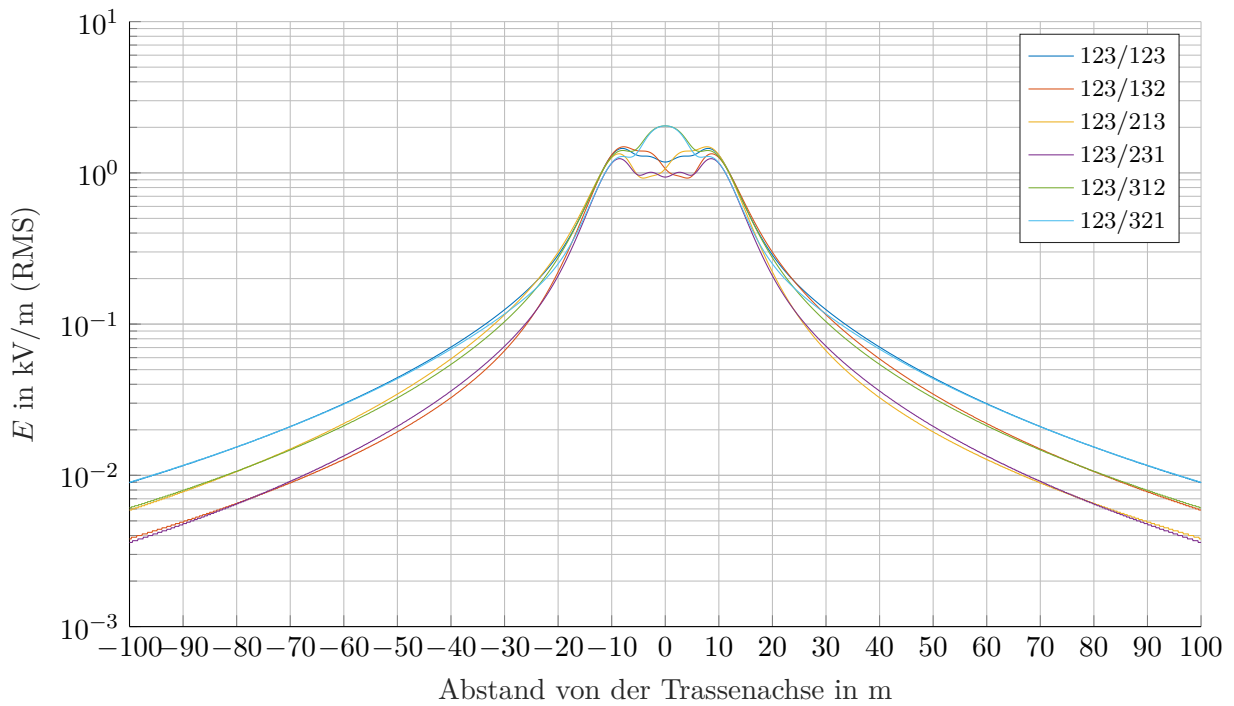


Abbildung 3.12: Elektrische Feldstärke beim Typ Donau 74 in Abhängigkeit von der Phasenanordnung

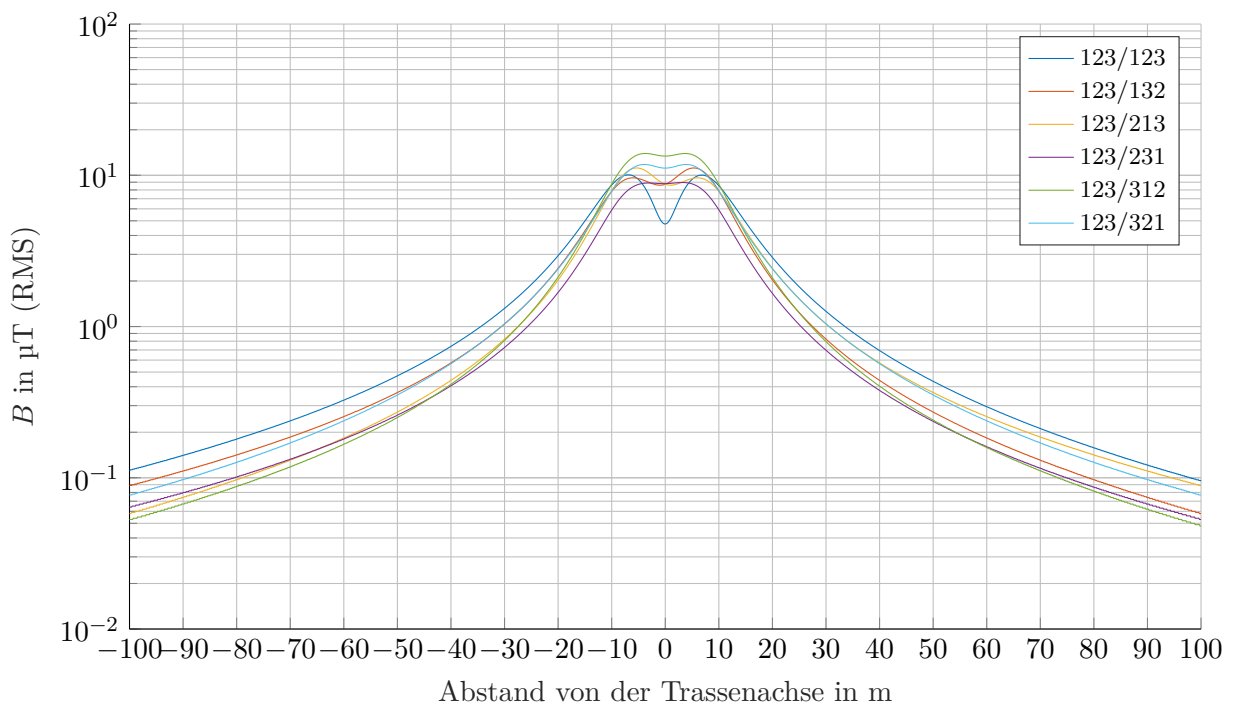


Abbildung 3.13: Magnetische Flussdichte beim Typ Donau 74 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenanordnung

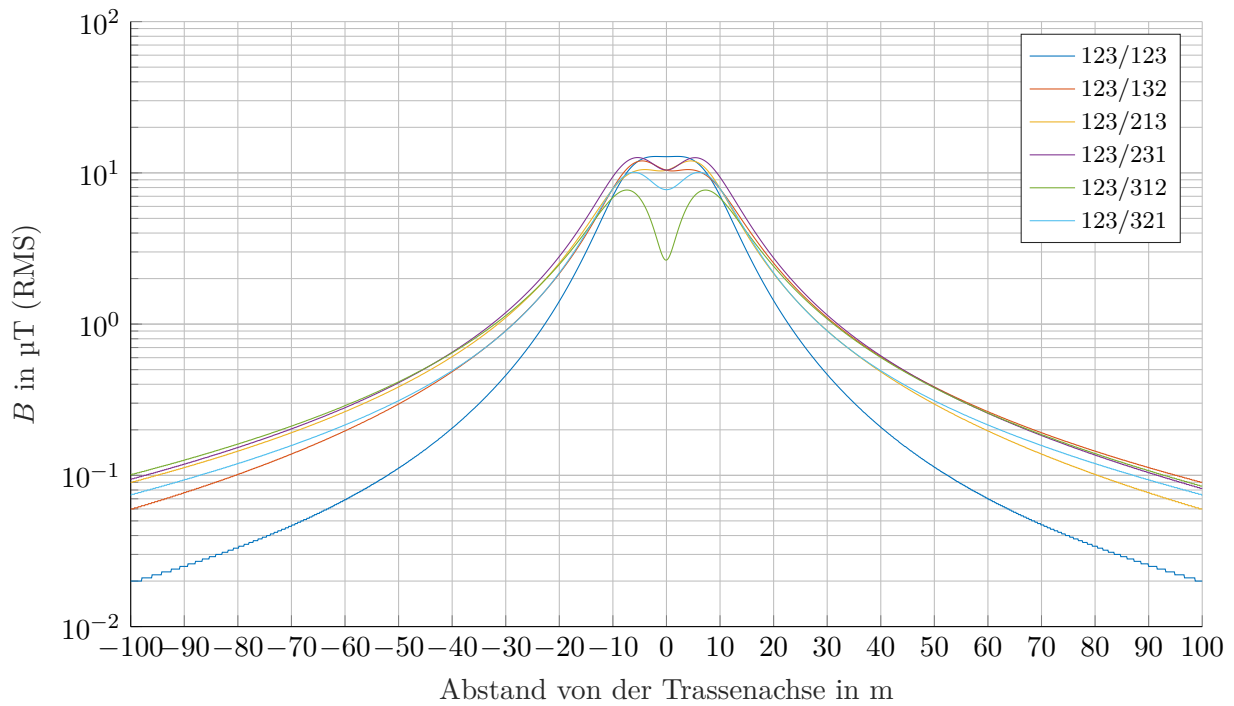


Abbildung 3.14: Magnetische Flussdichte beim Typ Donau 74 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

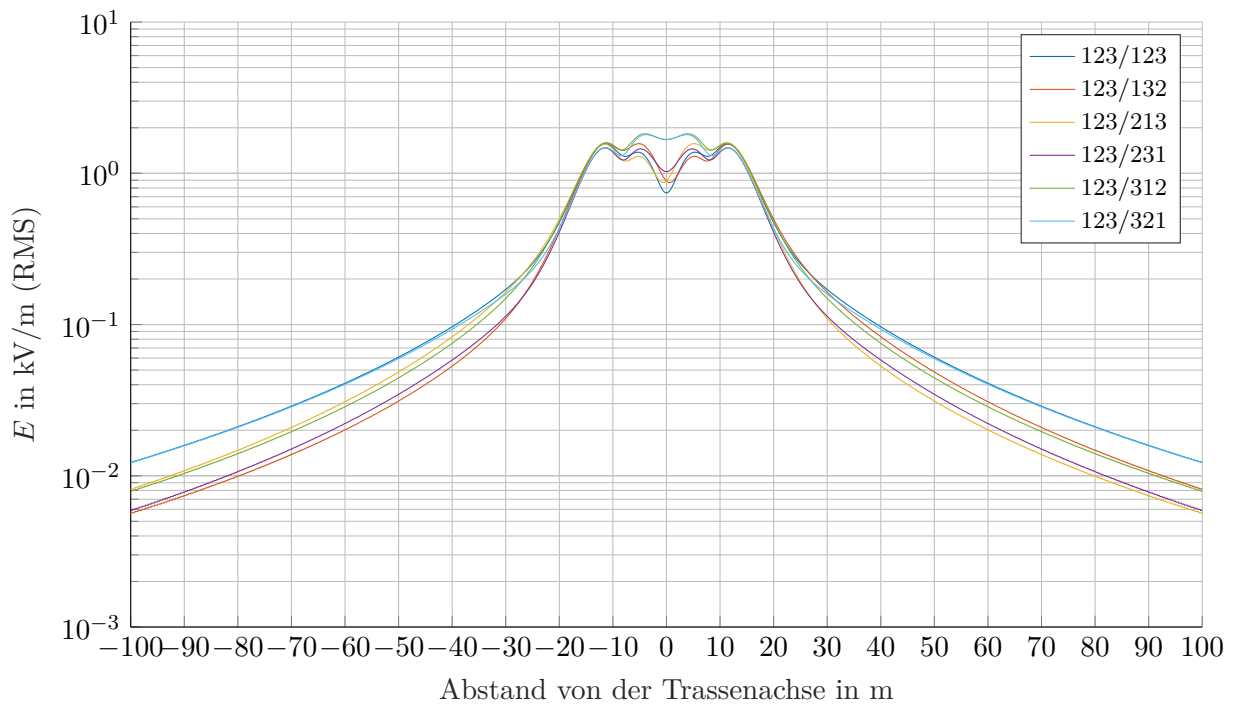


Abbildung 3.15: Elektrische Feldstärke beim Typ Donau 106 in Abhängigkeit von der Phasenordnung

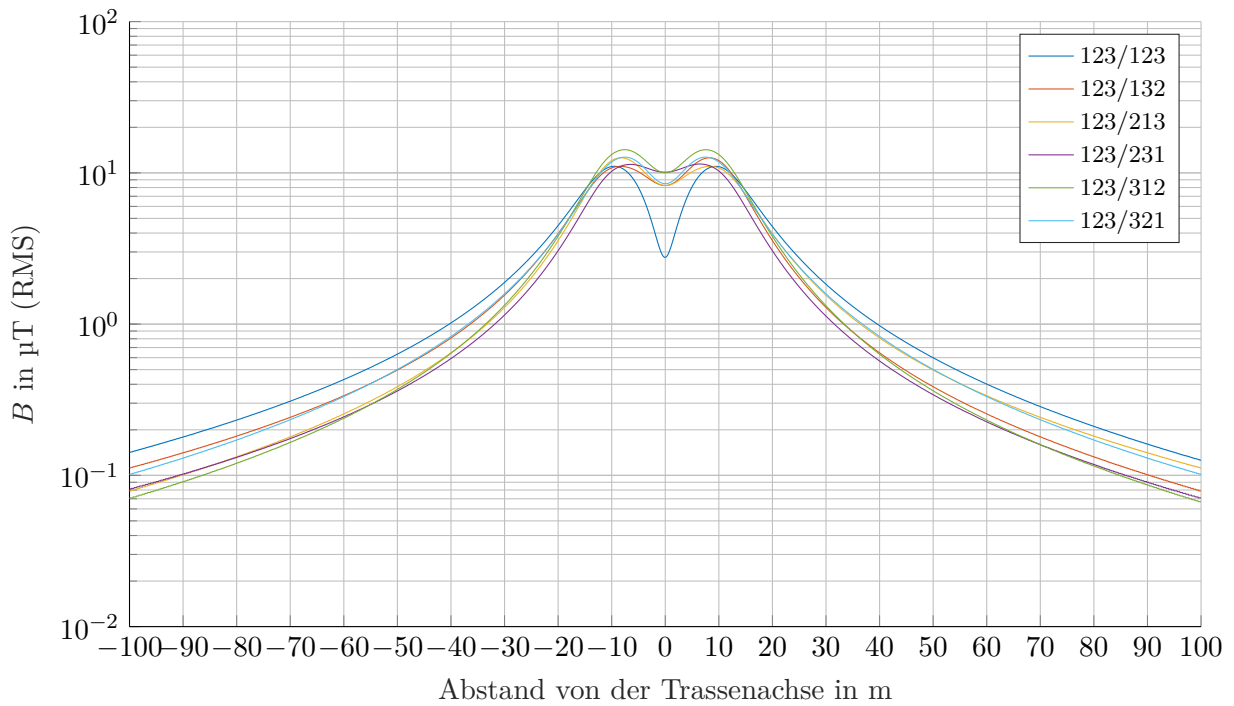


Abbildung 3.16: Magnetische Flussdichte beim Typ Donau 106 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

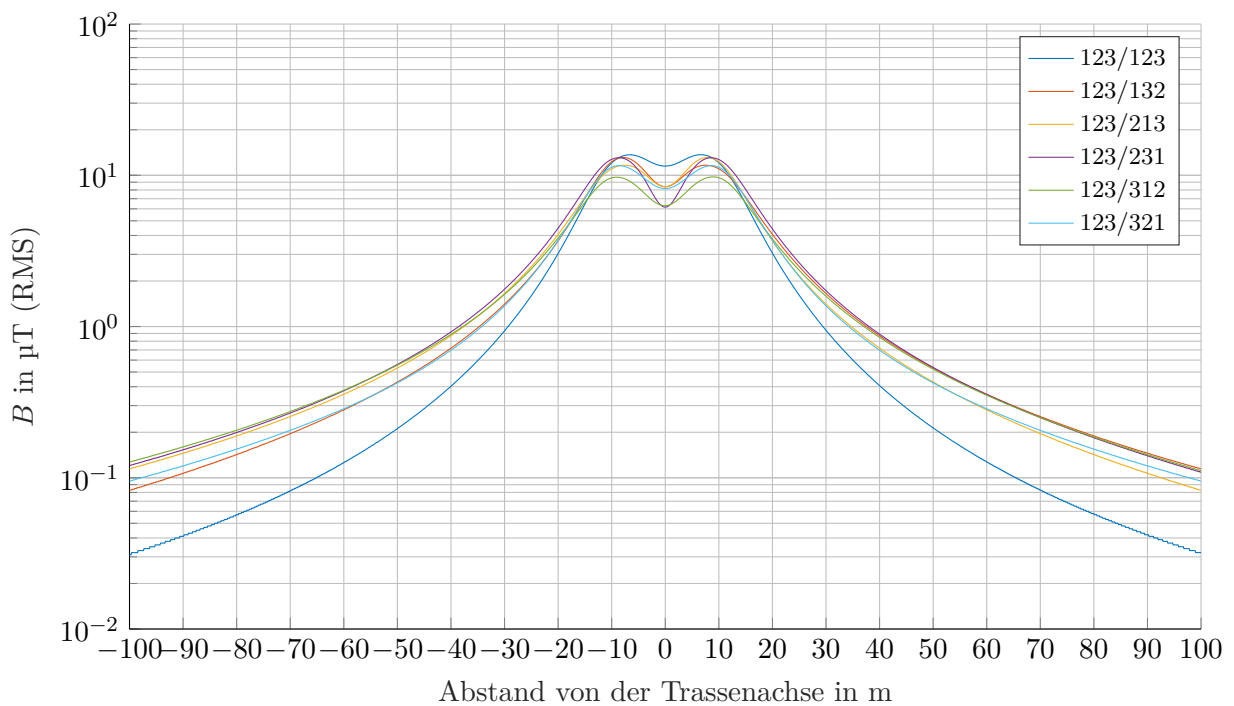


Abbildung 3.17: Magnetische Flussdichte beim Typ Donau 106 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

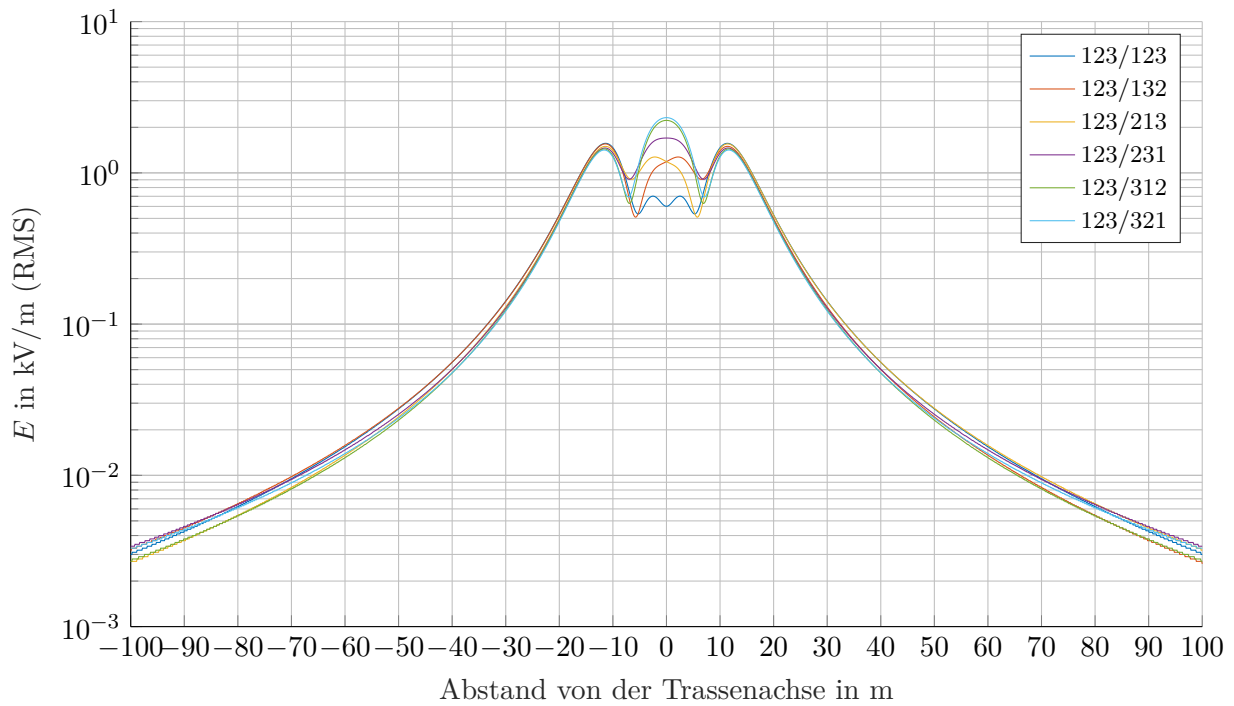


Abbildung 3.18: Elektrische Feldstärke beim Typ Einebene-Zweissystem 100 in Abhängigkeit von der Phasenordnung

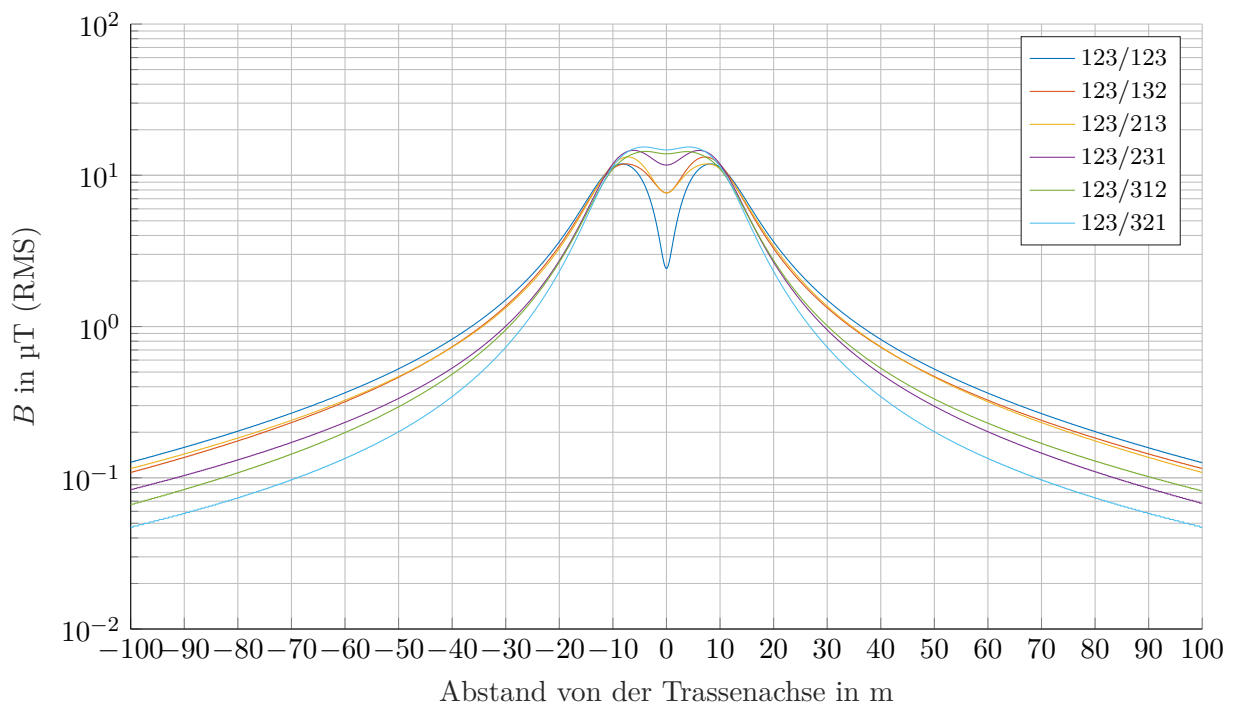


Abbildung 3.19: Magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Zweissystem 100 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

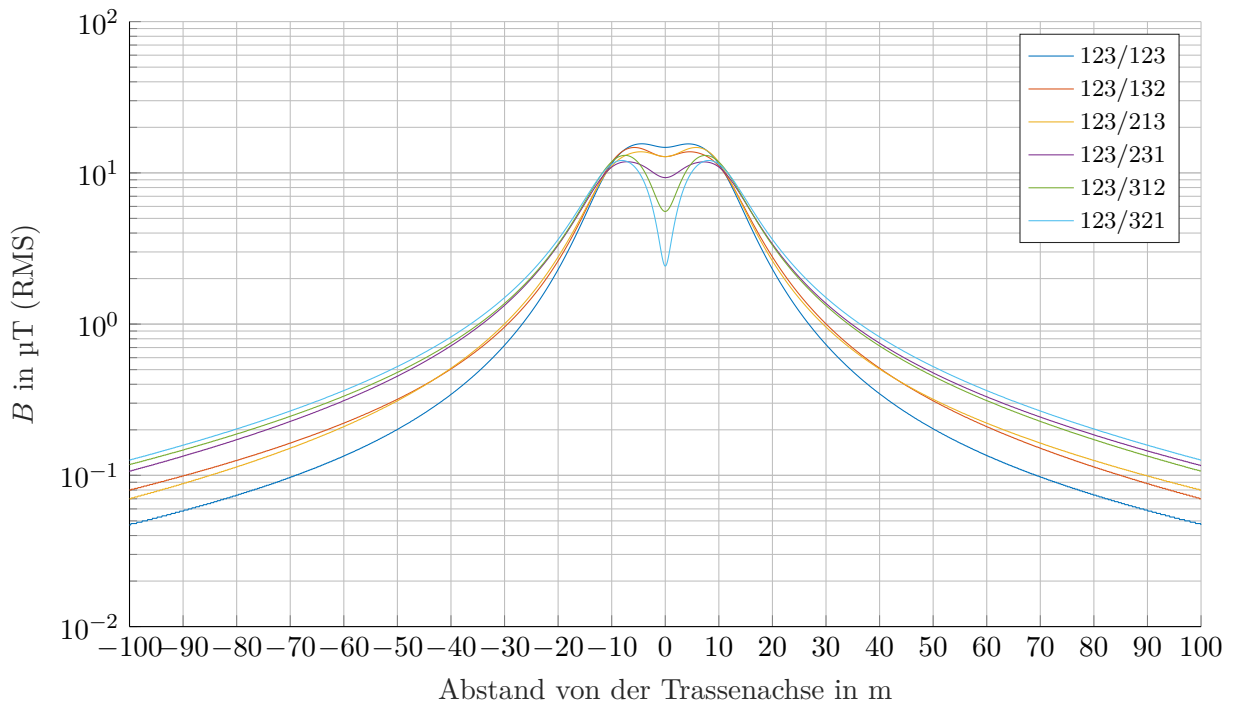


Abbildung 3.20: Magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Zweissystem 100 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

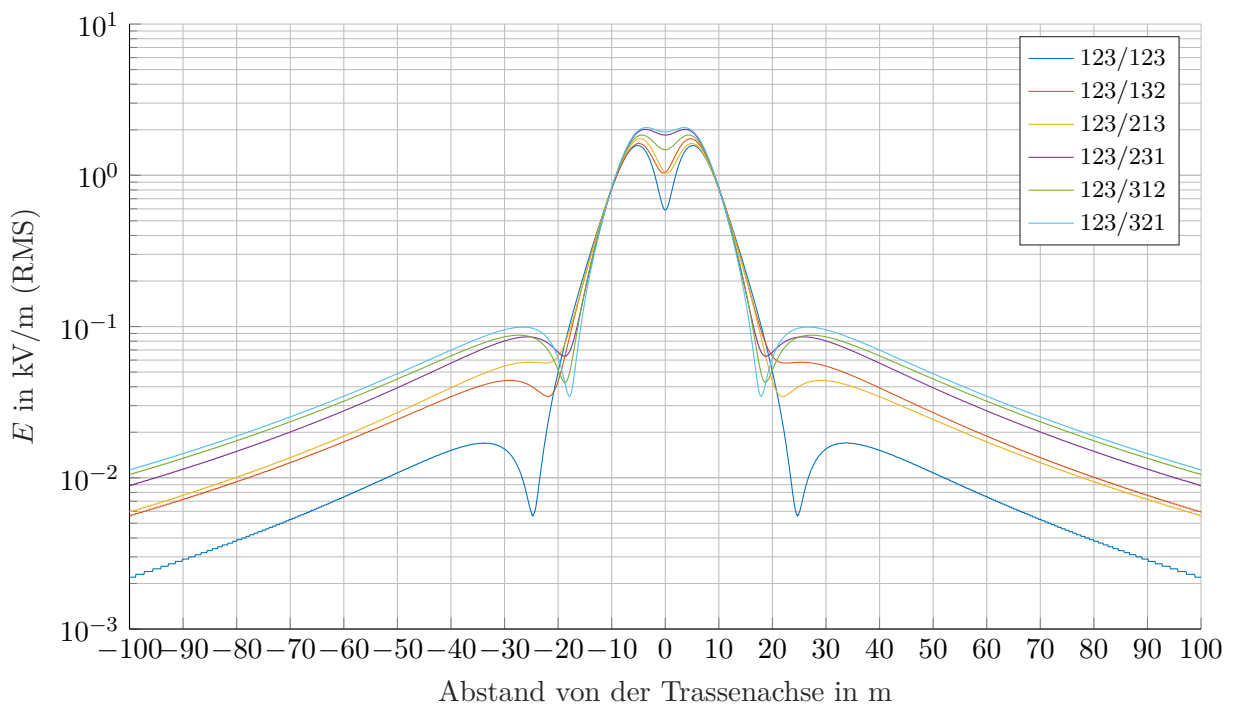


Abbildung 3.21: Elektrische Feldstärke beim Typ Tanne 45 in Abhängigkeit von der Phasenordnung

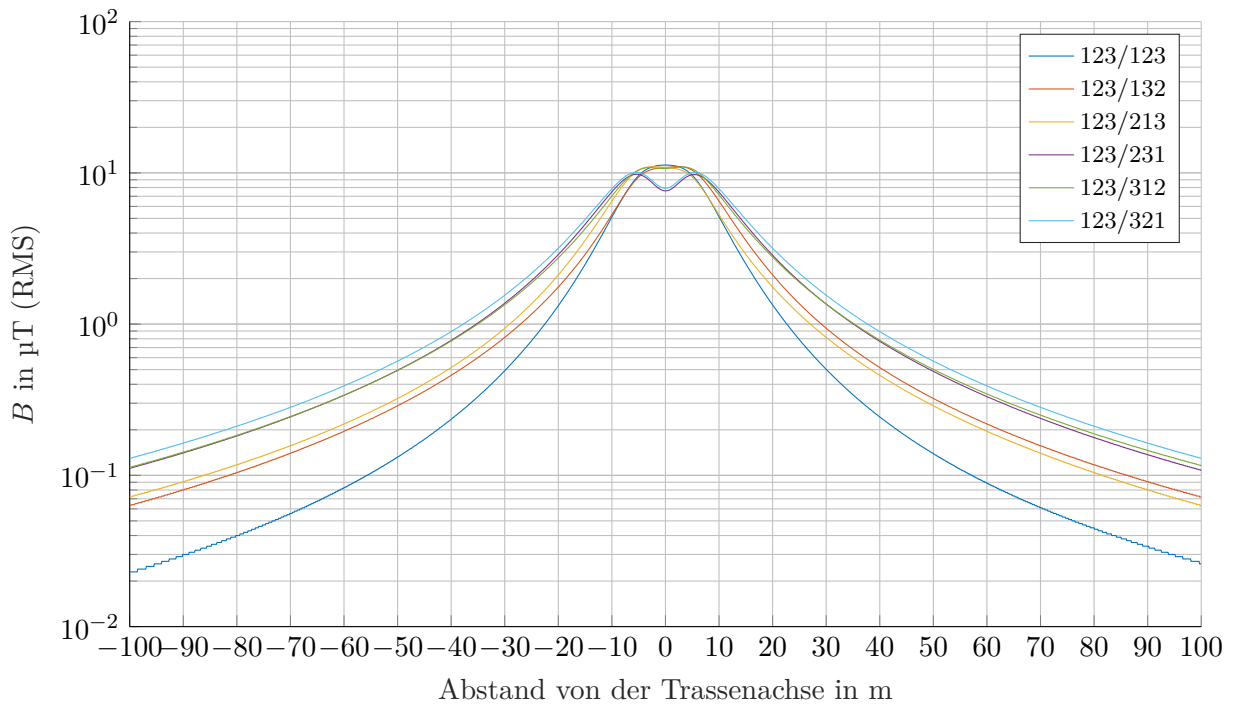


Abbildung 3.22: Magnetische Flussdichte beim Typ Tanne 45 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

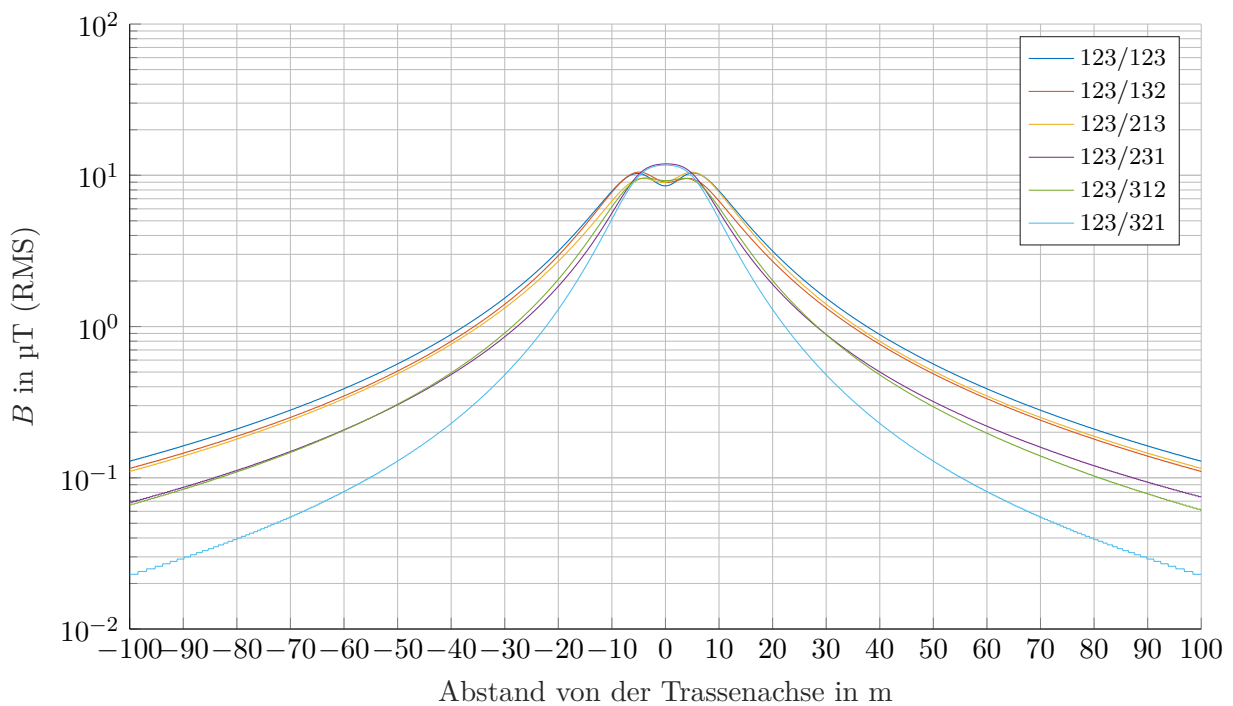


Abbildung 3.23: Magnetische Flussdichte beim Typ Tanne 45 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

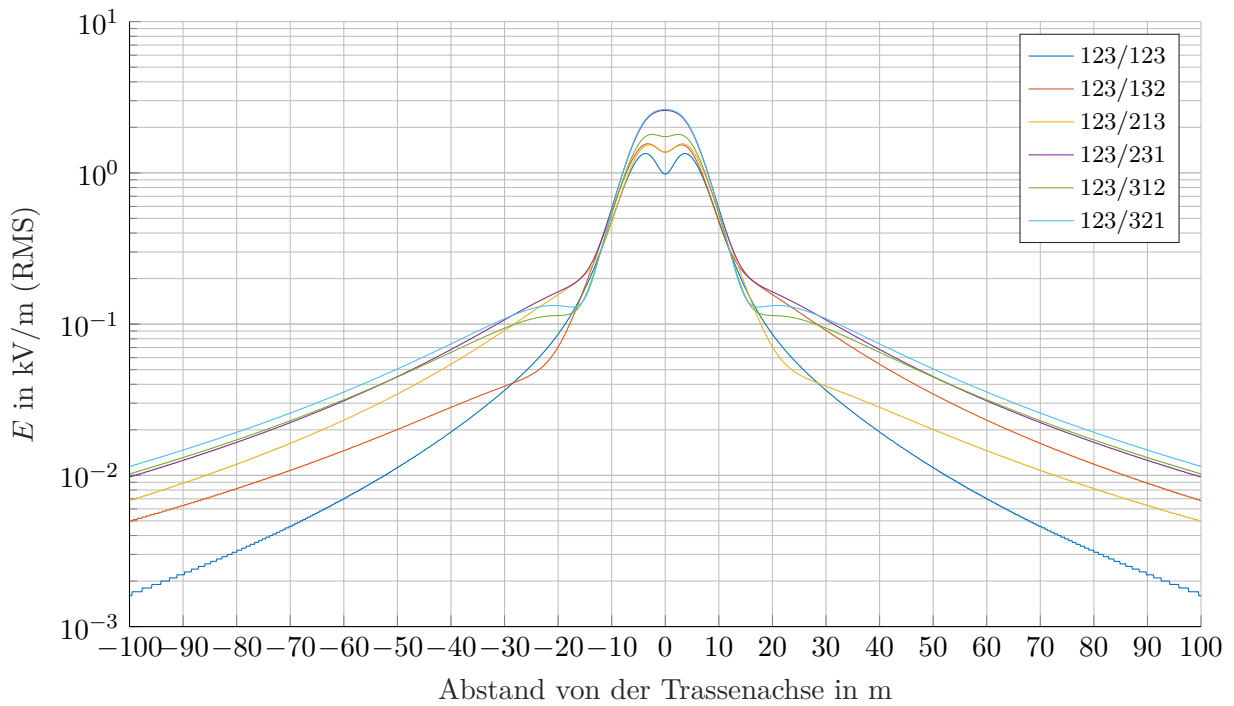


Abbildung 3.24: Elektrische Feldstärke beim Typ Tonne 30 in Abhängigkeit von der Phasenanordnung

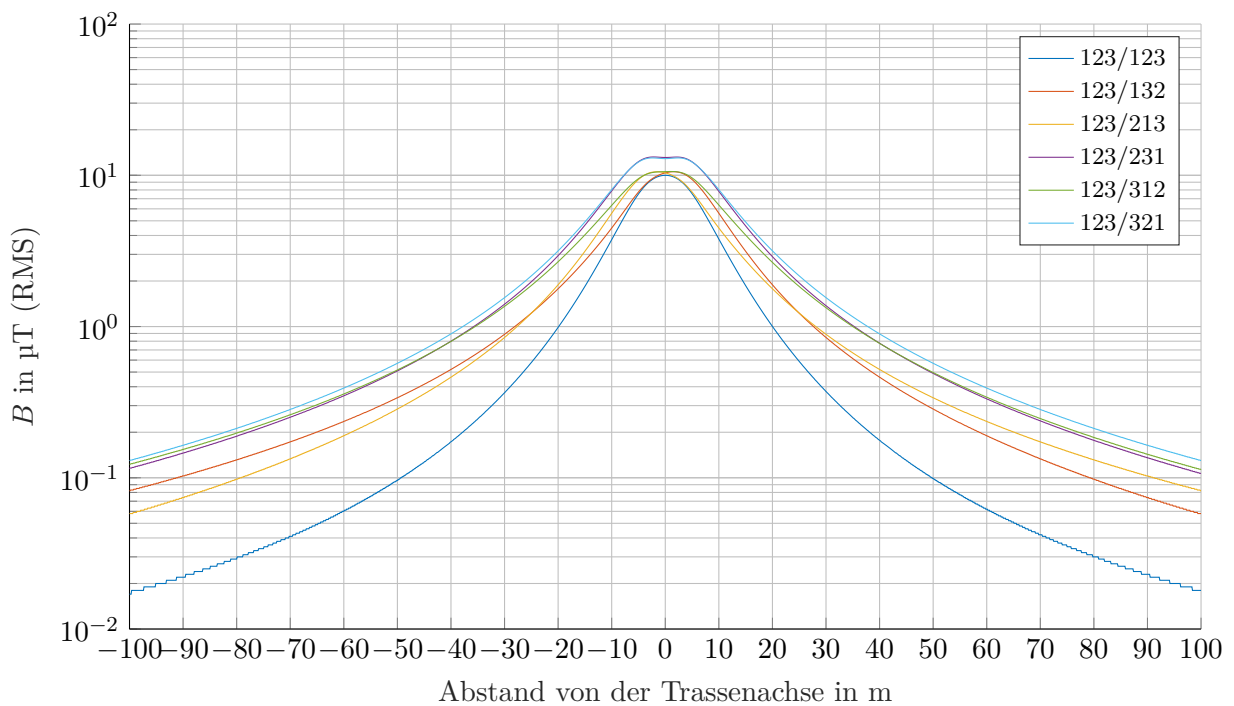


Abbildung 3.25: Magnetische Flussdichte beim Typ Tonne 30 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenanordnung

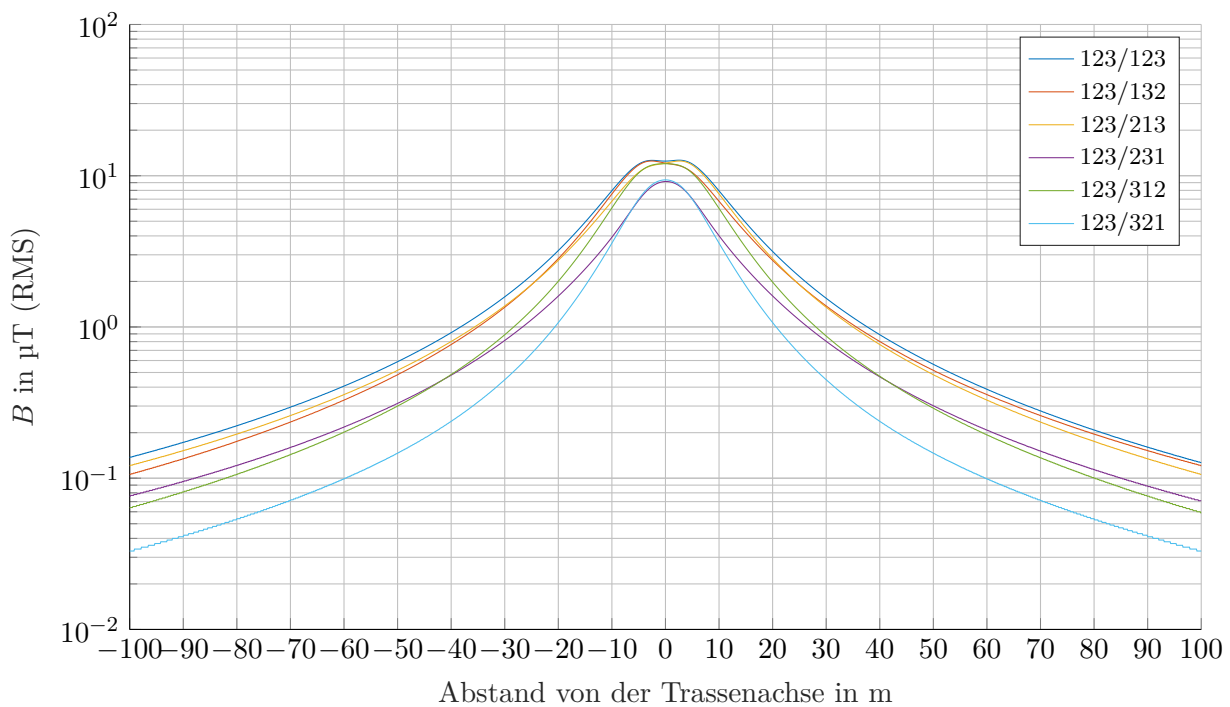


Abbildung 3.26: Magnetische Flussdichte beim Typ Tonne 30 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenanzordnung

3.1.1.3 Ergebnisse für die zweisystemigen Mastgeometrien

Aus den vorstehenden Abbildungen ergeben sich die folgenden Schlussfolgerungen:

- Beim Typ **Donau 62** ist zu erkennen, dass die Phasenanzordnung 123 / 231 die geringste elektrische Feldstärke zur Folge hat. Allenfalls im Bereich zwischen ca. 23 m und ca. 60 m Entfernung von der Trassenachse sind andere Anordnungen geringfügig überlegen (Abbildung 3.9). Bei der magnetischen Flussdichte bei gleichsinnigem Stromfluss ist ebenfalls die Anordnung 123 / 231 innerhalb von 40 m beiderseits der Trassenachse optimal, wobei im Bereich von ca. 3 m beiderseits der Trassenachse, also gewissermaßen im Zwischenraum zwischen den beiden Systemen, die Anordnung 123 / 123 diese Rolle übernimmt (Abbildung 3.10). Anders sieht dies bei gegensinnigem Stromfluss aus: Hier ist die Phasenanzordnung 123 / 312 innerhalb von ca. 10 m beiderseits der Trassenachse optimal, während darüber hinaus die Anordnung 123 / 123 mit Abstand die geringsten Flussdichten hervorruft (Abbildung 3.11). Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass die Anordnung 123 / 123 sowohl im Falle der magnetischen Flussdichte bei gleichsinnigem Stromfluss als auch bei der elektrischen Feldstärke eine der ungünstigsten Anordnungen darstellt.
- Beim Typ **Donau 74** gelten annähernd dieselben Schlussfolgerungen wie beim Typ Donau 62 (Abbildungen 3.12, 3.13 und 3.14). Beim Typ **Donau 106** sind die Verhältnisse dagegen komplizierter: Zwar ist die Anordnung 123 / 231 auch hier bei mehr als ca. 10 m Abstand von der Trassenachse insgesamt mit den geringsten elektrischen Feldstärken verbunden, doch betrachtet man jede Seite für sich, so sind einzelne andere Anordnungen geringfügig besser.

Unmittelbar unter den Leiterseilen wechseln die optimalen Anordnungen in rascher Folge (Abbildung 3.15). Ähnliches gilt bei gleichsinnigem Stromfluss (Abbildung 3.16). Bei gegensinnigem Stromfluss fällt die Rolle der optimalen Anordnung bei mehr als ca. 15 m Trassenabstand genau wie bei den kleineren Donau-Geometrien 123 / 123, während innerhalb dieses Abstandes 123 / 312 diese Rolle übernimmt (Abbildung 3.17).

- Beim Typ **Einebene-Zweissystem 100** hat die Phasenordnung nur im Bereich unmittelbar unterhalb der Leiterseile einen nennenswerten Einfluss auf die elektrische Feldstärke (Abbildung 3.18). Dort ist die Anordnung 123 / 123 optimal. Bei gleichsinnigem Stromfluss erzeugt die Phasenordnung 123 / 123 unmittelbar unterhalb der Leiterseile die geringste magnetische Flussdichte, während dieselbe Anordnung im übrigen Bereich die schlechtestmögliche Wahl darstellt. Dort ruft hingegen die Anordnung 123 / 321 die geringste Flussdichte hervor (Abbildung 3.19). Im Falle des gegensinnigen Stromflusses sind die Rollen dieser beiden Phasenordnungen vertauscht (Abbildung 3.20).
- Im Falle der **Tanne 45** ruft die Phasenordnung 123 / 123 beinahe überall die geringsten elektrischen Feldstärken hervor. Einzige Ausnahme ist der Bereich weniger Meter um den Punkt von 20 m Abstand von der Trassenachse herum (Abbildung 3.21). Bei gleichsinnigem Stromfluss ist die Phasenordnung 123 / 231 unmittelbar unter den Leiterseilen optimal, während im übrigen Bereich die Anordnung 123 / 123 diese Rolle übernimmt (Abbildung 3.23). Bei gegensinnigem Stromfluss ist dagegen 123 / 123 unterhalb der Leiterseile optimal, während dies im übrigen Bereich auf 123 / 321 zutrifft (Abbildung 3.23).
- Beim Typ **Tonne 30** ist zumeist 123 / 123 die optimale Phasenordnung in Bezug auf die elektrische Feldstärke (Abbildung 3.24). Eine Ausnahme stellt der Bereich zwischen ca. 15 und 30 m Abstand von der Trassenachse dar. Bei gleichsinnigem Stromfluss ist die Phasenordnung 123 / 123 (Abbildung 3.25) und im Falle gegensinnigen Stromflusses die Anordnung 123 / 321 (Abbildung 3.26) eindeutig am besten zur Verringerung der magnetischen Flussdichte geeignet.

3.1.1.4 Modellierung der viersystemigen Mastgeometrien

Wie oben beschrieben, existieren bei zweissystemigen Mastgeometrien zwar 36 mögliche Phasenzuordnungen zu den Leiterseilen, jedoch nur sechs unterschiedliche Feldstärkeverläufe. Dieser Effekt beruht auf der Mittelwertbildung (RMS) – im zeitlichen Mittel sind die Feldstärkeverläufe innerhalb einer der sechs Gruppen tatsächlich identisch, doch sie unterscheiden sich in ihrer Phasenlage. Bei viersystemigen Mastgeometrien gibt es eine viel größere Vielfalt an möglichen Phasenzuordnungen und daraus resultierenden Phasenlagen der Feldkomponenten der einzelnen Leiterseile. Es kann daher nicht von vornherein davon ausgegangen werden, dass es auch hier eine derartige Reduktion gibt.

Es werden daher für die beiden betrachteten viersystemigen Mastgeometrien sämtliche $6^4 = 1296$ möglichen Phasenordnungen berechnet; zunächst mit der Annahme eines gleichsinnigen Stromflusses mit 500 A in allen Systemen. Die übrigen Parameter wie die Leiterseildurchmesser werden analog zu den zweissystemigen Anordnungen gesetzt. Weil die Betrachtung aller möglichen Lastflussrichtungskombinationen der einzelnen Systeme den Rahmen sprengen würde, soll beispielhaft

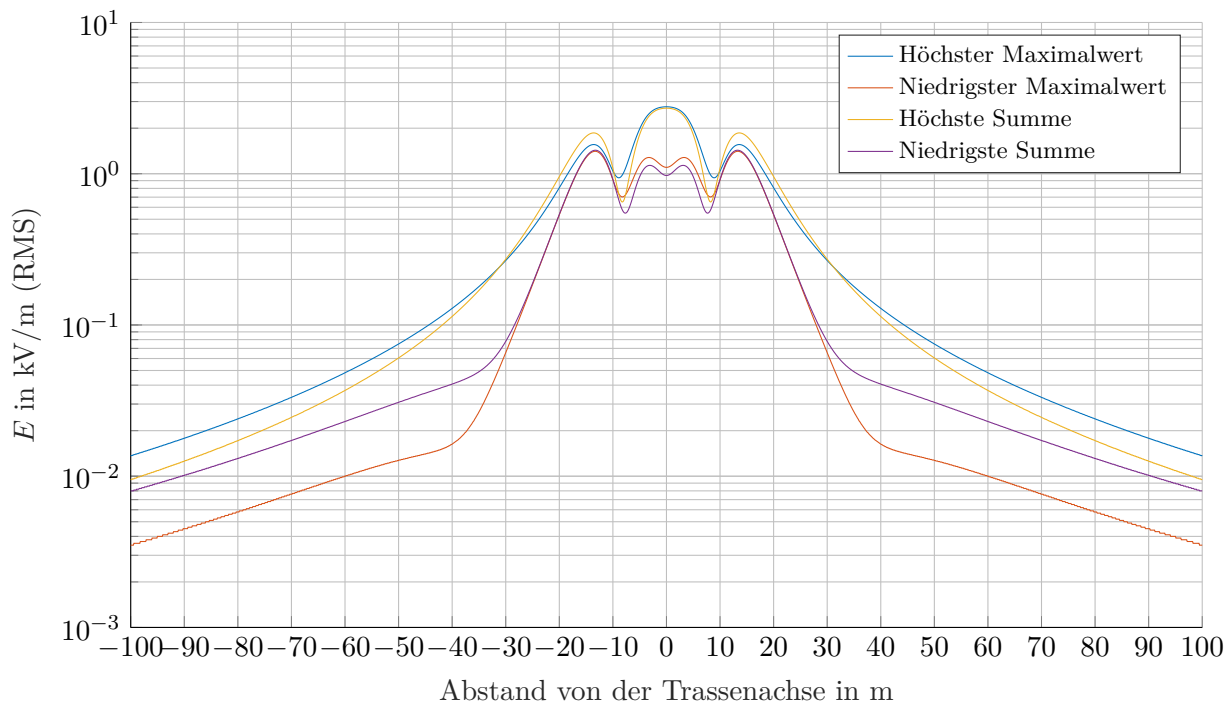


Abbildung 3.27: Extremwerte der elektrischen Feldstärke beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 in Abhängigkeit von der Phasenanzordnung

die Lastflussanordnung --- / +++ / +++ / +++ betrachtet werden. Da die Darstellung von 1296 Datenlinien innerhalb eines Diagramms sehr unübersichtlich wäre, werden lediglich jeweils vier ausgewählte Konstellationen gezeigt: diejenigen Datenreihen mit dem höchsten und mit dem niedrigsten Maximalwert sowie diejenigen, die über den gesamten Querschnitt die geringste Feldstärke- bzw. Flussdichtesumme aufweisen. Die Häufigkeitsverteilung der Maximalwerte wird jeweils zusätzlich dargestellt.

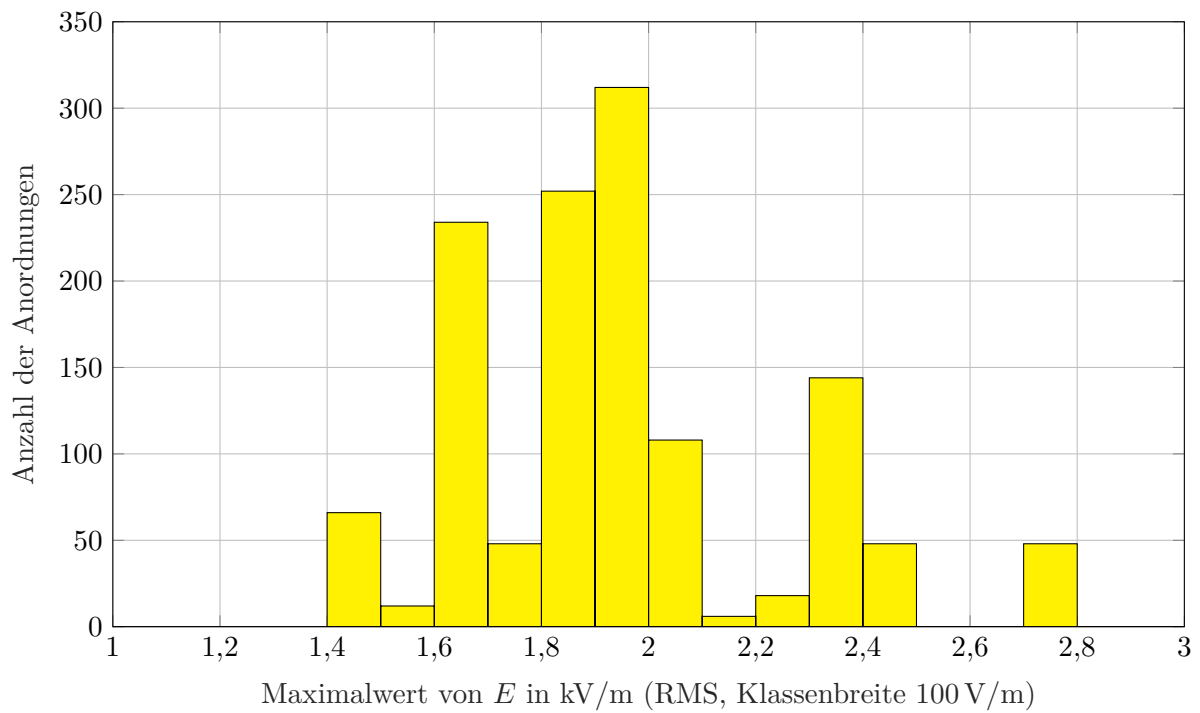


Abbildung 3.28: Häufigkeitsverteilung der elektrischen Feldstärke beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 in Abhängigkeit von der Phasenordnung

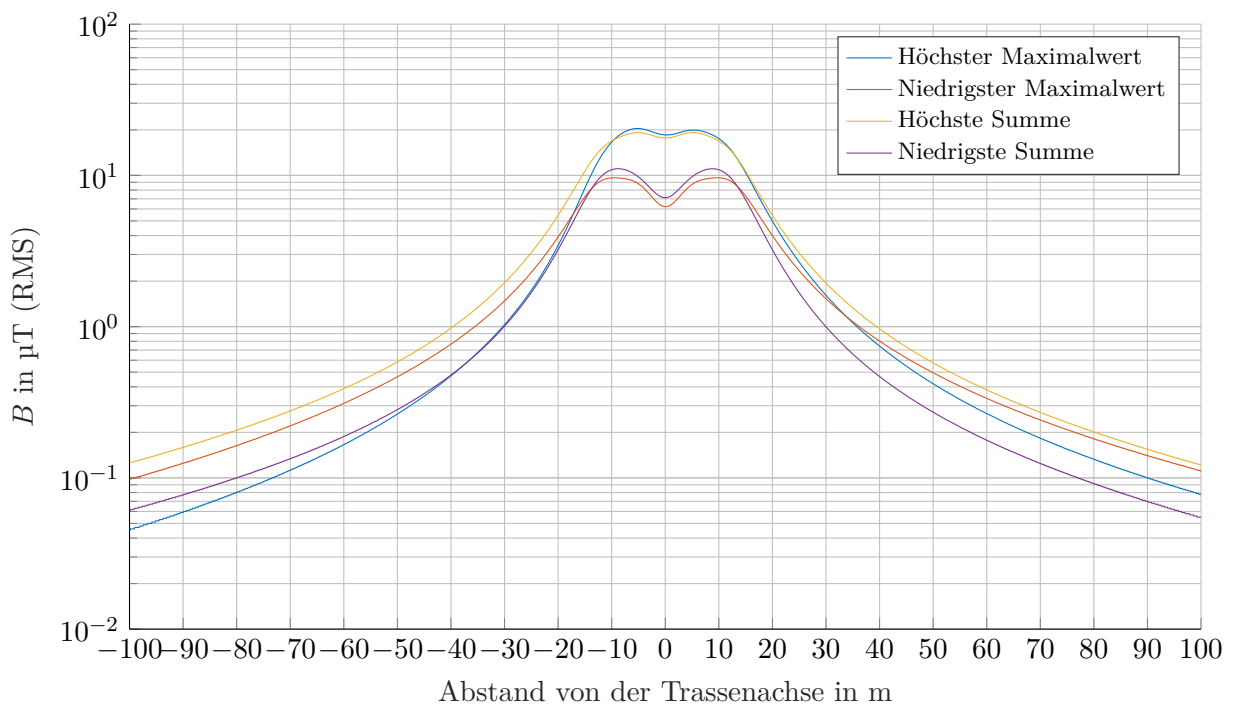


Abbildung 3.29: Extremwerte der magnetischen Flussdichte beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

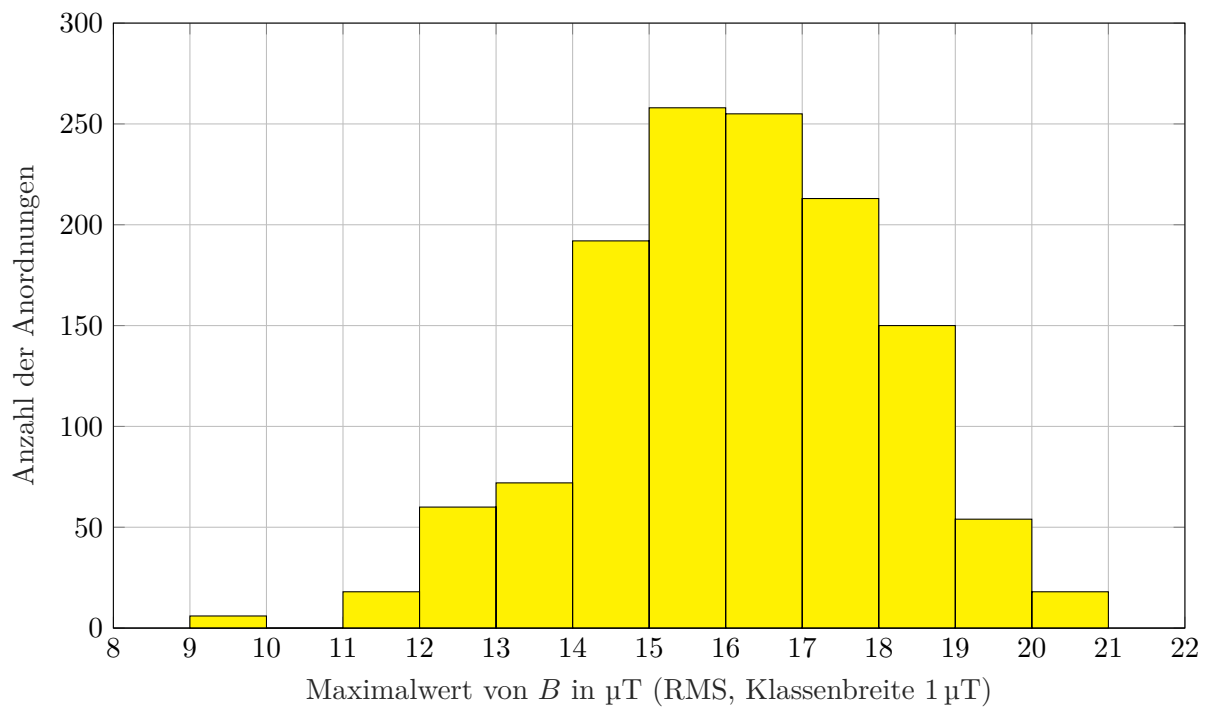


Abbildung 3.30: Häufigkeitsverteilung der magnetischen Flussdichte beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasen-anordnung

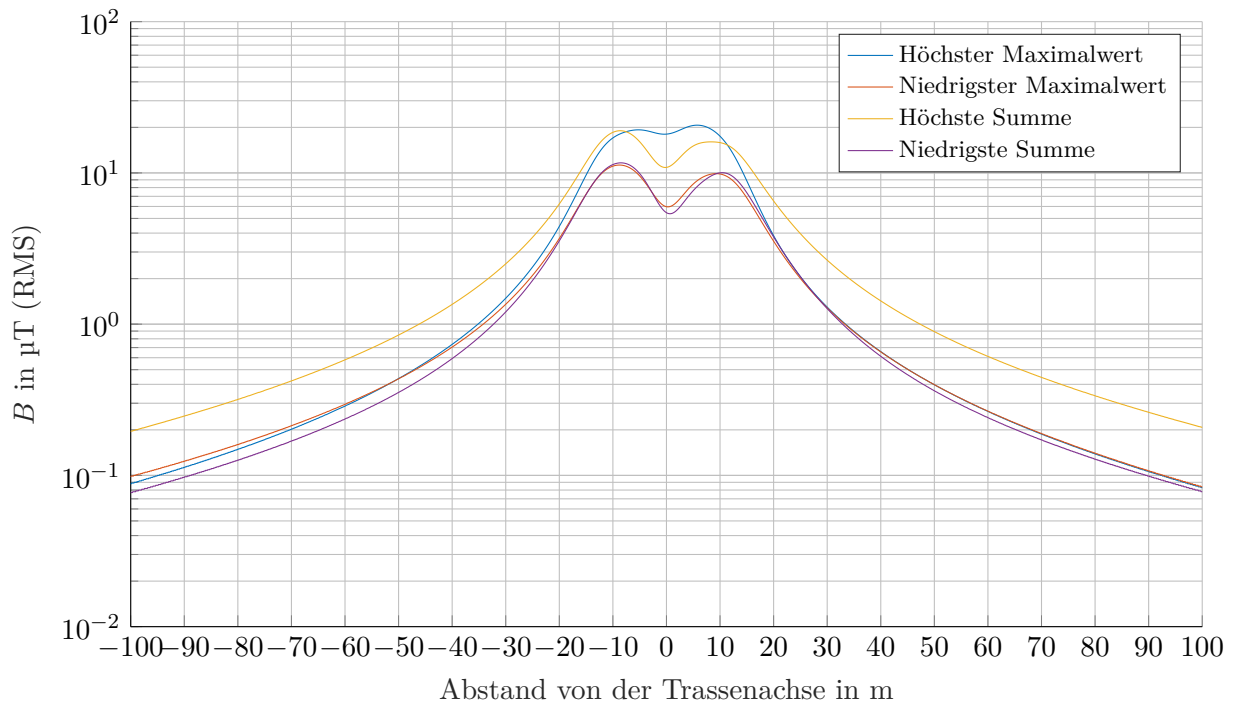


Abbildung 3.31: Extremwerte der magnetischen Flussdichte beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 mit Stromfluss ---/+++/+++/+++ in Abhängigkeit von der Phasen-anordnung

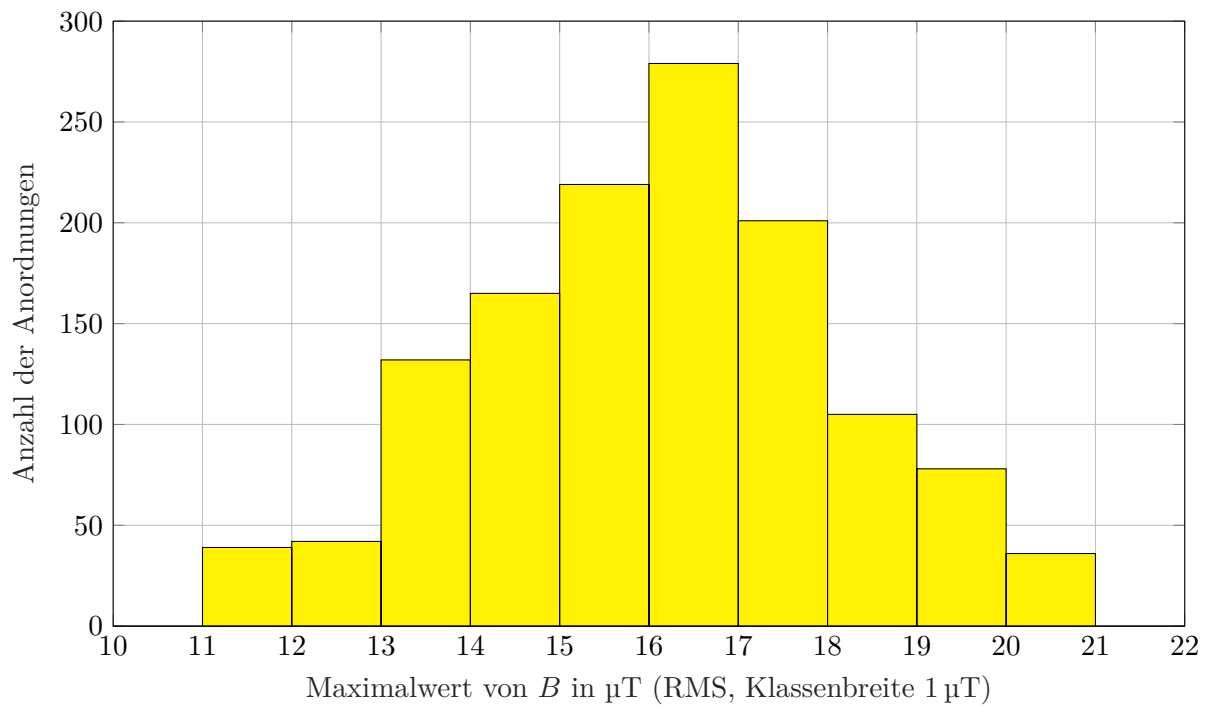


Abbildung 3.32: Häufigkeitsverteilung der magnetischen Flussdichte beim Typ Ein Ebene-Donau-Viersystem 121 mit Stromfluss ---/+++ /+++ /+++ in Abhängigkeit von der Phasenanzordnung

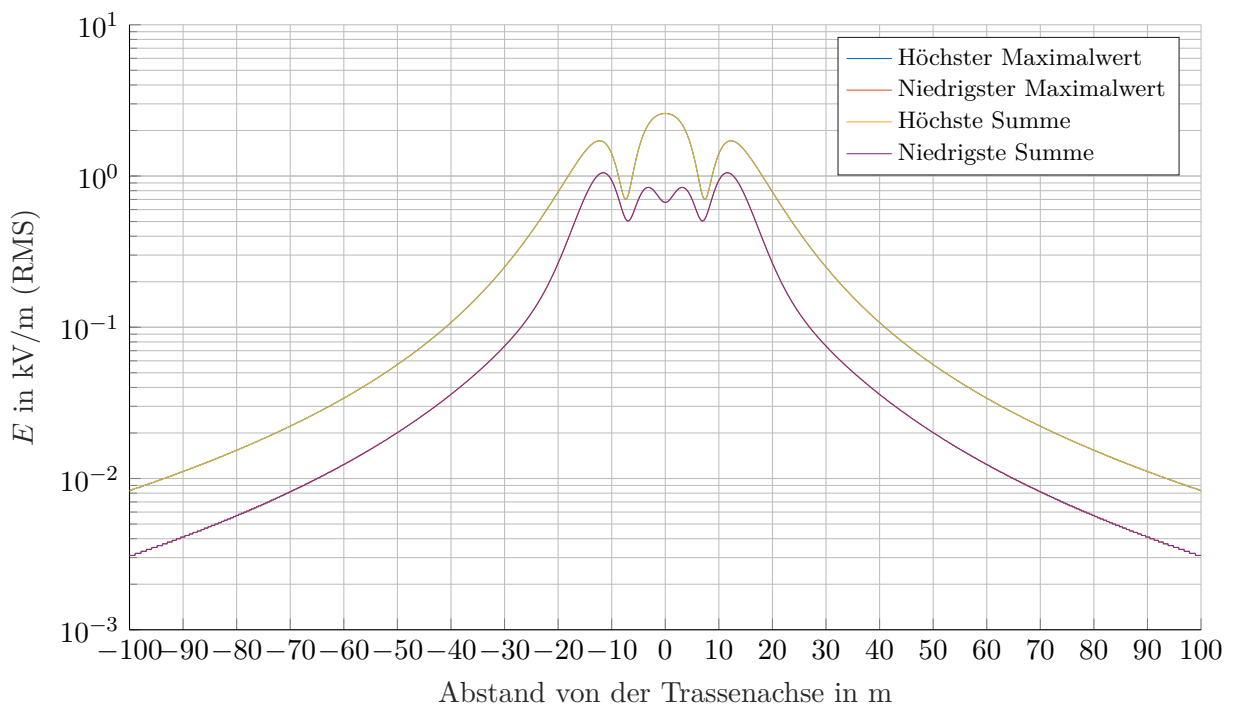


Abbildung 3.33: Extremwerte der elektrischen Feldstärke beim Typ Ein Ebene-Viersystem 102 in Abhängigkeit von der Phasenanzordnung

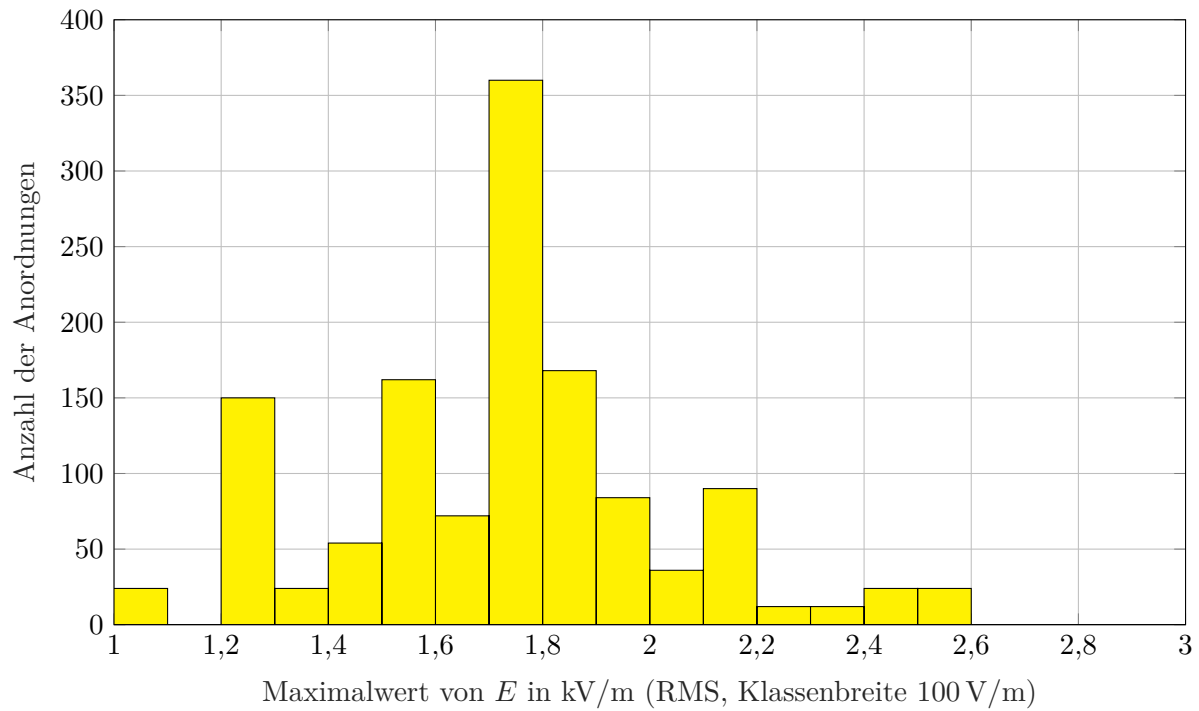


Abbildung 3.34: Häufigkeitsverteilung der elektrischen Feldstärke beim Typ Einebene-Viersystem 102 in Abhängigkeit von der Phasenanzordnung

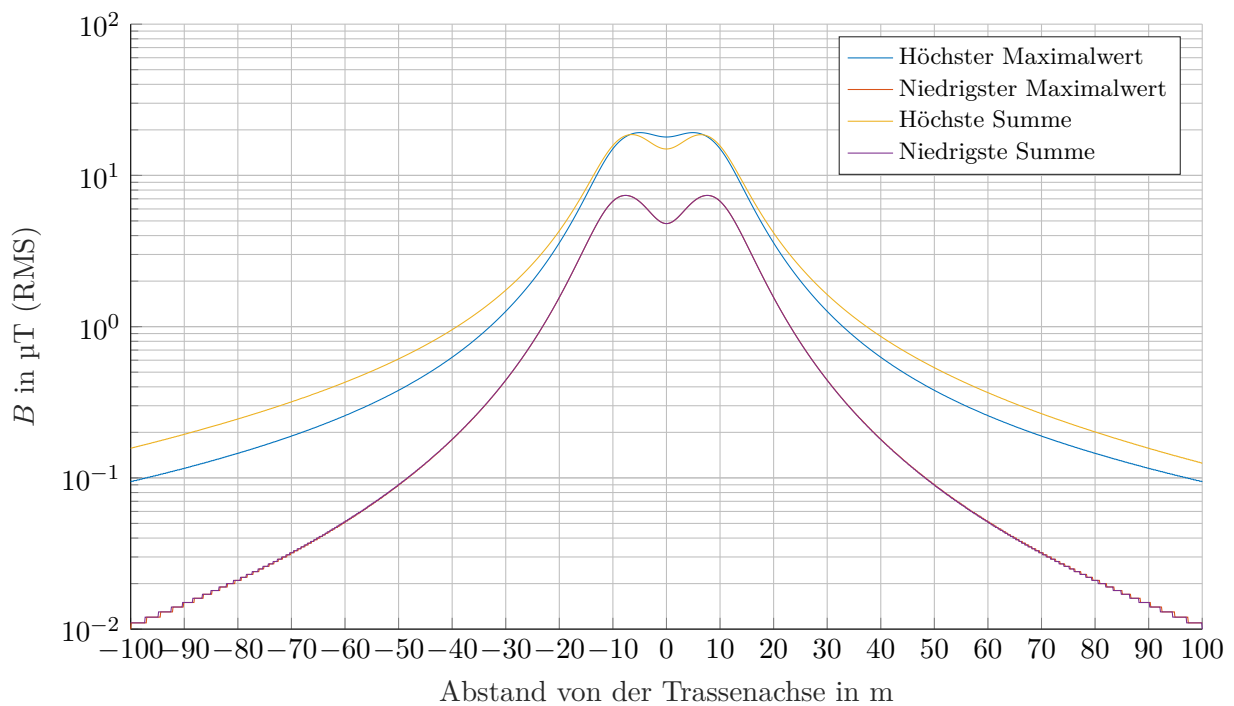


Abbildung 3.35: Extremwerte der magnetischen Flussdichte beim Typ Einebene-Viersystem 102 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenanzordnung

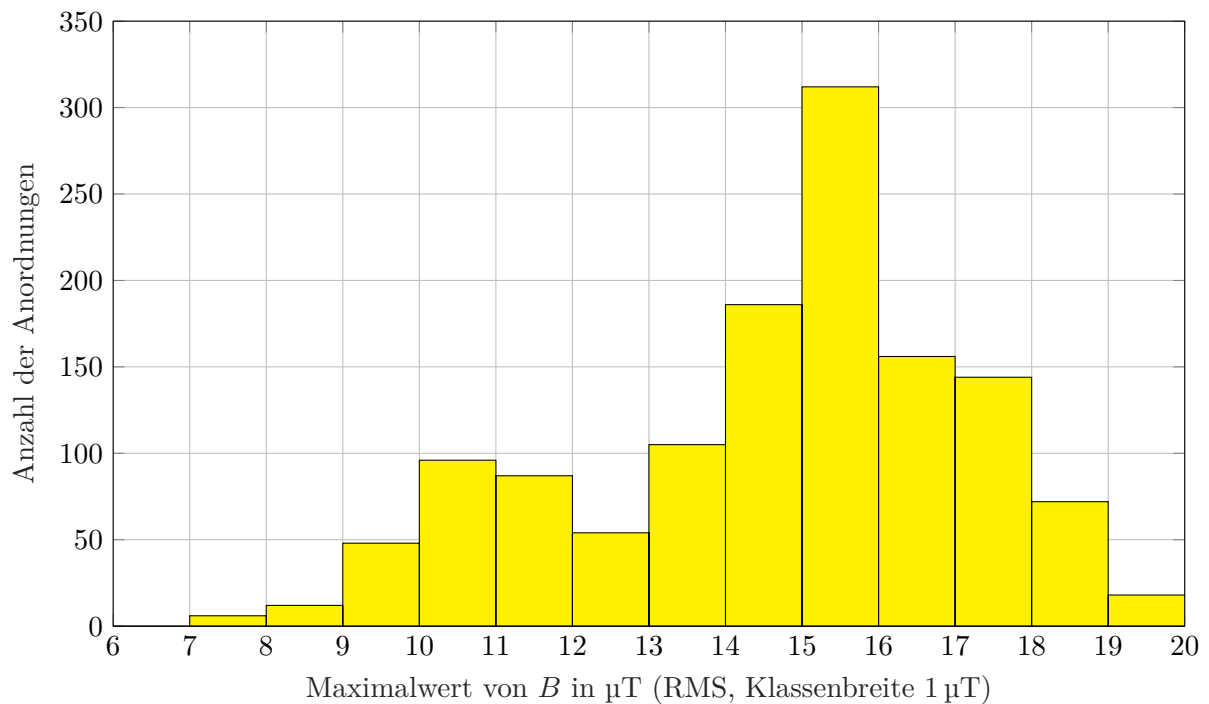


Abbildung 3.36: Häufigkeitsverteilung der magnetischen Flussdichte beim Typ Ein Ebene-Viersystem 102 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

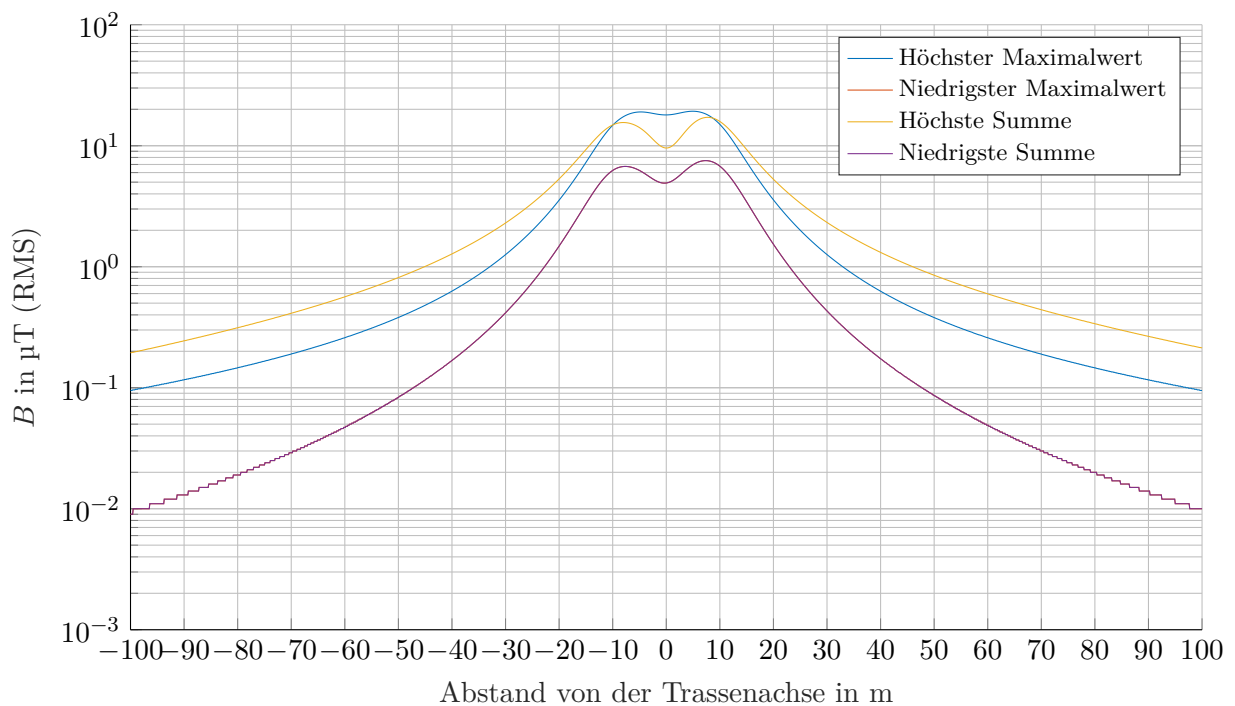


Abbildung 3.37: Extremwerte der magnetischen Flussdichte beim Typ Ein Ebene-Viersystem 102 mit Stromfluss ---/+++/+++/+++ in Abhängigkeit von der Phasenordnung

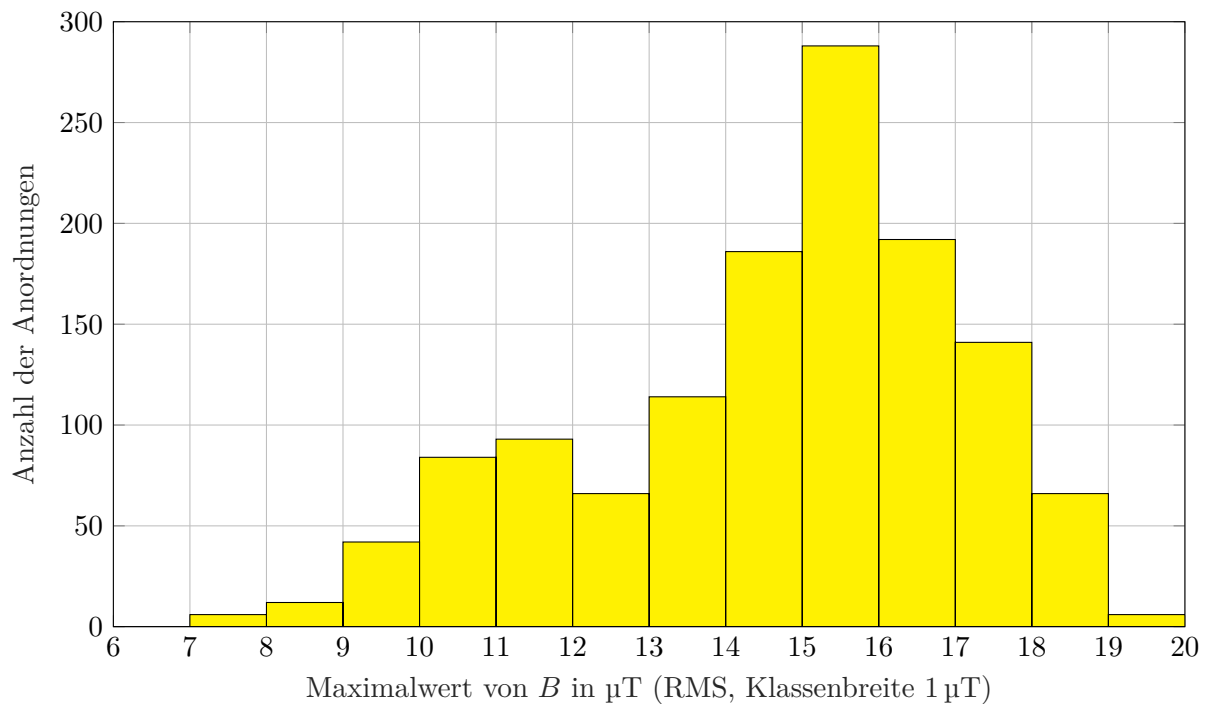


Abbildung 3.38: Häufigkeitsverteilung der magnetischen Flussdichte beim Typ Einebene-Viersystem 102 mit Stromfluss ---/+++/+++/+++ in Abhängigkeit von der Phasen-anordnung

3.1.1.5 Ergebnisse für die viersystemigen Mastgeometrien

Es zeigt sich, dass beim Typ **Einebene-Donau-Viersystem 121** eine deutliche Verringerung des Maximalwertes der elektrischen Feldstärke erreicht werden kann (Abbildung 3.27). Im Histogramm ist eine eher zerklüftete Verteilung der Maximalwerte der elektrischen Feldstärke auf die Anordnungen zu erkennen (Abbildung 3.28). Bei der magnetischen Flussdichte ist der Unterschied zwischen den schlechtesten und besten Phasenanordnungen in weiten Teilen des betrachteten Querschnitts geringer, aber in weniger als etwa 10 m Abstand von der Trassenachse dennoch deutlich ausgeprägt (Abbildungen 3.29 und 3.31). In den Histogrammen zeigt sich eine Verteilung, die insbesondere bei gegensinnigem Stromfluss Ähnlichkeit mit einer Normalverteilung aufweist (Abbildungen 3.30 und 3.32).

Beim Typ **Einebene-Viersystem 102** zeigt sich, dass die Optimierung der Phasenanordnung eine deutliche Verringerung der elektrischen Feldstärke zur Folge hat (Abbildung 3.33). Im Histogramm ist zu erkennen, dass es nur wenige Phasenanordnungen mit besonders niedriger oder besonders hoher Feldstärke gibt, während im Mittelfeld eine große Anzahl von Kombinationen mit einem Maximalwert zwischen 1,7 und 1,8 kV/m heraussteicht (Abbildung 3.34). Auch bei der magnetischen Flussdichte kann durch Phasenoptimierung eine deutliche Verringerung erzielt werden (Abbildungen 3.35 und 3.37). Die Histogramme zeigen, dass es nur wenige Anordnungen mit geringem Maximalwert der Flussdichte gibt, dafür aber viele, deren Flussdichte-Maximalwerte sich im oberen Drittel bewegen (Abbildungen 3.36 und 3.38).

Es wurde untersucht, ob, vergleichbar mit den Verhältnissen bei zweisystemigen Mastgeometrien, Phasenarrangements mit jeweils identischen Feldstärke- bzw. Flussdichteverläufen existieren. Es zeigt sich, dass es jeweils drei Phasenarrangements gibt, die denselben Verlauf der magnetischen Flussdichte erzeugen. Diese sind in Tabelle 3.8 aufgelistet. Dabei fällt auf, dass sich die drei Kombinationen jeweils durch die Erhöhung aller Phasendizes um eins voneinander ableiten lassen, was einer Phasenverschiebung um 120° bei gleichbleibendem Drehsinn in jedem System entspricht. Im Gegensatz dazu gibt es nur jeweils zwei Phasenarrangements, die denselben elektrischen Feldstärkeverlauf erzeugen (Tabelle 3.9). Die jeweils andere Phasenarrangement erhält man hier durch Vertauschen der Phasen 2 und 3 in allen Systemen, was einer Änderung der Drehfeldrichtung bei gleichbleibender Phasenlage entspricht.

Tabelle 3.8: Phasenkombinationen mit gleicher magnetischer Flussdichteverteilung der viersystemigen Mastgeometrien

Geometrie	Höchster Maximalwert	Niedrigster Maximalwert	Höchste Summe	Niedrigste Summe
Einebene-Donau	123/312/213/312	123/123/321/321	132/213/132/213	132/213/231/312
Viersystem 121	231/123/321/123	231/231/132/132	213/321/213/321	213/321/312/123
(gleichsinnig)	312/231/132/231	312/312/213/213	321/132/321/132	321/132/123/231
Einebene-Donau-	132/321/213/312	132/321/132/123	132/321/231/321	132/231/132/132
Viersystem 121	213/132/321/123	213/132/213/231	213/132/312/132	213/312/213/213
(gegensinnig)	321/213/132/231	321/213/321/312	321/213/123/213	321/123/321/321
Einebene-	123/321/123/321	123/123/321/321	123/231/123/231	132/132/231/231
Viersystem 102	231/132/231/132	231/231/132/132	231/312/231/312	213/213/312/312
(gleichsinnig)	312/213/312/213	312/312/213/213	312/123/312/123	321/321/123/123
Einebene-	132/132/231/132	132/231/132/132	132/213/231/213	132/231/132/132
Viersystem 102	213/213/312/213	213/312/213/213	213/321/312/321	213/312/213/213
(gegensinnig)	321/321/123/321	321/123/321/321	321/132/123/132	321/123/321/321

Tabelle 3.9: Phasenkombinationen mit gleicher elektrischer Feldstärkeverteilung der viersystemigen Mastgeometrien

Geometrie	Höchster Maximalwert	Niedrigster Maximalwert	Höchste Summe	Niedrigste Summe
Einebene-Donau	231/132/321/123	231/123/132/321	213/321/213/321	231/231/132/132
Viersystem 121	321/123/231/132	321/132/123/231	312/231/312/231	321/321/123/123
Einebene-	213/312/213/312	213/213/312/312	231/132/231/132	213/213/312/312
Viersystem 102	312/213/312/213	312/312/213/213	321/123/321/123	312/312/213/213

Beim Blick in beide Tabellen fällt auf, dass es beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 zwei Phasenarrangements gibt, die eine Optimierung sowohl im Hinblick auf das elektrische Feld als auch auf die magnetische Flussdichte darstellen:

- 231 / 231 / 132 / 132 (niedrigster Maximalwert der magnetischen Flussdichte bei gleichsinnigem Stromfluss und niedrigste Summe der elektrischen Feldstärke) und
- 321 / 132 / 123 / 231 (niedrigste Summe der magnetischen Flussdichte bei gleichsinnigem Stromfluss und niedrigster Maximalwert der elektrischen Feldstärke).

Beim Typ Einebene-Viersystem 102 ist auffällig, dass bei gegensinnigem Lastfluss die Phasen-anordnungen für den niedrigsten Maximalwert und für die niedrigste Summe der magnetischen Flussdichte identisch sind; dasselbe gilt für die elektrische Feldstärke. Ferner gibt es auch hier zwei Phasen-anordnungen, die für beide Feldgrößen eine Optimierung bedeuten:

- 312 / 312 / 213 / 213 (niedrigster Maximalwert der magnetischen Flussdichte bei gleichsinnigem Stromfluss und niedrigster Maximalwert / niedrigste Summe der elektrischen Feldstärke) und
- 213 / 213 / 312 / 312 (niedrigste Summe der magnetischen Flussdichte bei gleichsinnigem Stromfluss und niedrigster Maximalwert / niedrigste Summe der elektrischen Feldstärke).

Es ist anzumerken, dass beim Blick in Abbildung 3.35 der Eindruck entstehen mag, dass der niedrigste Maximalwert und die niedrigste Summe identisch seien. Beim rechnerischen Vergleich der Zahlenwerte erweist sich dies jedoch als Trugschluss.

3.1.1.6 Bewertung

Insgesamt zeigt es sich, dass es zwar Phasen-anordnungen gibt, die sowohl für die magnetische Flussdichte bei gleichsinnigem Stromfluss als auch für die elektrische Feldstärke eine Minimierung bedeuten. Allerdings existiert keine Phasen-anordnung, die für gleich- und gegensinnigen Stromfluss zugleich eine Optimierung der magnetischen Flussdichte bewirken würde; ebenso wenig gibt es eine Phasen-anordnung, die dies für das elektrische Feld und die magnetische Flussdichte bei gegensinnigem Stromfluss zur Folge hätte. Da es bei viersystemigen Anordnungen eine ganze Reihe von unterschiedlichen Lastflussrichtungskombinationen mit unterschiedlichen Flussdichteverteilungen gibt, liegt die Festlegung einer gesamt optimalen Phasenbelegung in weiter Ferne.

Zusammengefasst lässt sich zur Feldminimierung durch Optimieren der Phasen-anordnung feststellen, dass bei zweisystemigen Anordnungen in vielen Fällen eine Phasen-anordnung existiert, die über weite Teile des Trassenquerschnitts sowohl im Hinblick auf die elektrische Feldstärke als auch auf die magnetische Flussdichte eine Minimierung darstellt. Allerdings ist dieselbe Phasen-anordnung bei gegensinnigem Stromfluss oftmals die ungünstigste, wie auch die 26. BImSchVVwV feststellt. Bei den viersystemigen Anordnungen verhält es sich ähnlich: Hier existieren zwar jeweils zwei Phasen-anordnungen, die sowohl für das elektrische Feld als auch für die magnetische Flussdichte optimal sind – dies allerdings nur bei gleich- und nicht bei gegensinnigem Stromfluss. Insgesamt kann festgestellt werden, dass eine Feldminimierung durch Optimieren der Phasen-anordnung im Zeitalter der dezentralen Erzeugung nicht durchführbar ist. Eine Ausnahme besteht lediglich im Falle (kurzer) Anschlussleitungen großer Industriebetriebe bzw. Einspeiser wie Wind- oder Photovoltaikparks, wo der Natur der Sache gemäß zumindest im Falle einer Stich-Anbindung die Stromflussrichtung eindeutig festgelegt ist.

Eine weitere Ausnahme besteht bei der Parallelschaltung mehrerer Systeme. Sind beide Systeme einer zweisystemigen Mastgeometrie elektrisch parallel geschaltet, ergibt sich in allen Fällen eine gleichsinnige Stromflussrichtung und damit die Möglichkeit zur Optimierung der Phasen-anordnung. Die Parallelschaltung mehrerer Systeme ist allerdings aus netzbetrieblicher Sicht nachteilig: Wird bei einer zweisystemigen Freileitung ein Leiterseil des einen von zwei unabhängigen Stromkreisen

beschädigt, so kann der zweite Stromkreis dennoch weiter betrieben werden. Sind hingegen beide Stromkreise parallel geschaltet, muss bei einem solchen Schaden aufgrund der entstehenden Unsymmetrie und der drohenden Überlastung der nur noch mit einem Leiterseil betriebenen Phase die gesamte Leitung abgeschaltet werden. Dieselbe Zuverlässigkeit könnte folglich auch mit dem geringeren baulichen Aufwand einer einsystemigen Freileitung erreicht werden, weswegen die Parallelschaltung von Systemen nur in Ausnahmefällen vorkommt.

Nebenbei sei bemerkt, dass die Phasenanschlussreihenfolge in vielen Fällen durch technische Gegebenheiten vorgegeben ist. So ergibt sich die Phasenbelegung einer Freileitung oft durch die Phasenbelegung in den angeschlossenen Umspannwerken, da versucht wird, mit möglichst wenig Überwerfungen die Phasenleiter vom Abspannportal auf den ersten Freileitungsmast zu führen. Ein ähnlicher Grund liegt vor, wenn eine Leitung von einer anderen abzweigt und dieser Abzweig mit dem geringsten Aufwand an Traversen und Stützisolatoren bewerkstelligt werden soll. Die Einfügung von Verdrillmasten, an denen die Phasenordnung im Verlauf der Freileitung angepasst werden kann, ist in der 110-kV-Spannungsebene aufgrund der relativ kurzen Stromkreislängen und der daraus resultierenden relativ kleinen Unsymmetrien unüblich.

3.1.1.7 Feldoptimierte Mastgeometrien

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass es Mastgeometrien gibt, die unabhängig von der Phasenbelegung eine feldoptimale Konfiguration darstellen. Eines davon ist das von Bauhofer patentierte „Sondermastbild SM2“ ([20] Abschnitt B Kapitel 4.2), das in Abbildung 3.39 dargestellt ist. Eine beispielhafte Phasenbelegung ist in Abbildung 3.40 zu sehen. Es fällt auf, dass zwei der Phasenleiter innerhalb des Mastschaftes angeordnet sind; außerdem beträgt der seitliche Abstand zwischen Mastschaft und den an den Traversen angeordneten Leiterseilen lediglich 2 m. Dies führt dazu, dass dieser Masttyp für Wartungsarbeiten nur dann bestiegen werden kann, wenn beide Systeme abgeschaltet sind. Das aber hätte eine Verletzung des (n-1)-Kriteriums und damit eine erhebliche Beeinträchtigung der Versorgungssicherheit zur Folge. Bauhofer ist sich dieser Einschränkung bewusst und empfiehlt als Lösung das Arbeiten unter Spannung [20]. Arbeiten unter Spannung erfordert allerdings neben besonders geschultem Personal auch den Einsatz isolierter Hubarbeitsbühnen oder, beispielsweise in schwer zugänglichem Gelände, sogar von Hubschraubern. Die wirtschaftliche Verhältnismäßigkeit eines solchen Sondermastbildes steht in Anbetracht der bei dessen Instandhaltung anfallenden erheblichen Kosten in Frage.

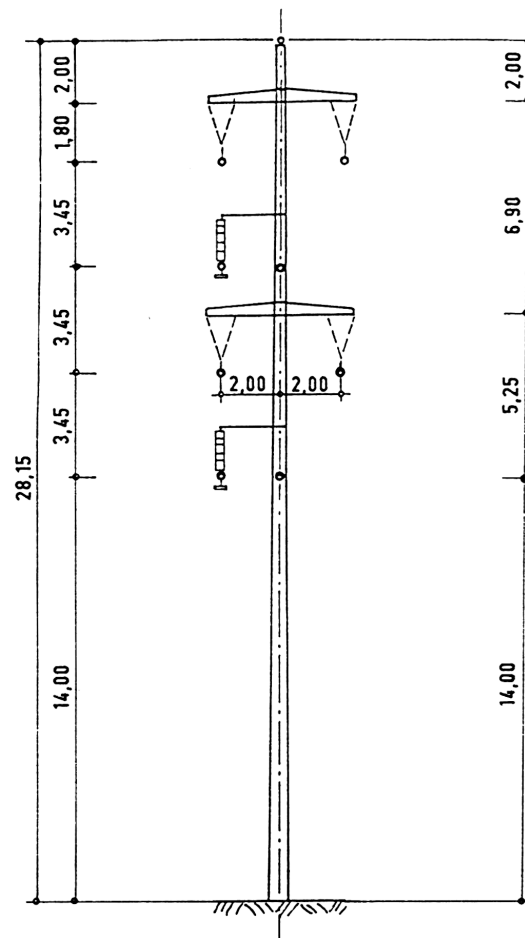


Abbildung 3.39: Sondermastbild SM2 nach Bauhofer [20]

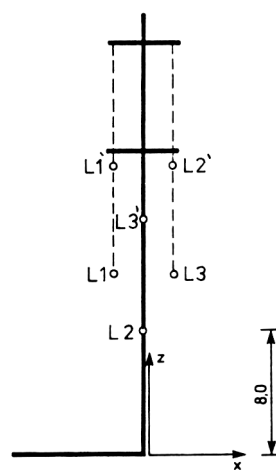


Abbildung 3.40: Beispielhafte Phasenbelegung am Mastbild SM2 nach Bauhofer [20]

3.1.2 Abstandsoptimierung

Die 26. BImSchVV schreibt zur Minimierungsmaßnahme der Abstandsoptimierung in ihrem Abschnitt 5.3.1.1:

„Ziel der Maßnahme ist es, die Distanz der Leiterseile zu maßgeblichen Minimierungsorten zu vergrößern. Zum Boden wird die Distanz zum Beispiel durch die Erhöhung der Masten oder die Verringerung der Spannfeldlängen vergrößert. Wird ein Stromkreis auf einer von einem maßgeblichen Minimierungsort abgewandten Traverse – Querausleger – geführt, verringert dies die Immission an diesem Ort.“

Voraussetzungen: Die Bodenbeschaffenheit muss geeignete Mastfundamente ermöglichen, wenn die Masten erhöht werden. Der Bodenabstand der Leiterseile kann bei Neubau planerisch festgelegt werden.

Wirksamkeit: Grundsätzlich ist sie in Trassennähe hoch und nimmt mit zunehmendem Abstand zur Trasse ab.

Hinweise: Die Wirksamkeit der Erhöhung des Bodenabstandes kann in Abhängigkeit von anderen Anlagenparametern, wie der Phasenanordnung bei Masten mit mehr als einem Stromkreis, in der Trasse sehr variabel sein und örtlich begrenzt eine entgegengesetzte Wirkung haben. Der zusätzliche Aufwand hängt von der jeweils realisierten Maßnahme ab. Er ist zum Beispiel für Masterhöhungen bei einer neu zu bauenden Leitung niedrig. Mit zunehmendem Bodenabstand steigt der Aufwand stark an.“

Zuerst soll auf die Erhöhung der Masten bzw. auf die Verringerung der Spannfeldlängen eingegangen werden. Die Erhöhung der Masten bewirkt unmittelbar und die Verringerung der Spannfeldlängen mittelbar über den verringerten Durchhang der Leiterseile einen größeren Abstand zwischen Leiterseilen und Boden. Dies soll für alle im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Mastgeometrien simuliert werden. Ausgehend von einem Abstand der untersten Leiterseile vom Boden (h_{\min}) von 7 m (siehe Abschnitt 3.1.1.1) werden alle Leiterseile in 2-m-Schritten gemeinsam angehoben, bis eine h_{\min} von 15 m erreicht ist. Die Phasenanordnung ist dabei stets 123 / 123 im Falle der zweisystemigen Geometrien und 123 / 123 / 123 / 123 im Falle der viersystemigen Geometrien; die Stromflussrichtung ist in allen Fällen gleichsinnig positiv mit 500 A.

3.1.2.1 Ergebnisse

Dabei erhält man folgende Ergebnisse:

- Beim Typ **Einebene-Einsystem 60** sinkt die magnetische Flussdichte mit steigendem Leiterseil-Bodenabstand (Abbildung 3.41). Dies ist unmittelbar unter den Leiterseilen deutlich zu bemerken, während der Effekt bei mehr als etwa 30 m Abstand von der Trassenachse vernachlässigbar gering ist. Bei der elektrischen Feldstärke hingegen tritt eine Verringerung durch Abstandserhöhung nur innerhalb von 20 m von der Trassenachse ein; bei größeren Abständen bewirkt ein höherer Leiterseil-Bodenabstand erhöhte Feldstärkewerte (Abbildung 3.42).

- Bei der **Wetterfichte 43** gelten in Bezug auf die magnetische Flussdichte (Abbildung 3.43) und auf die elektrische Feldstärke (Abbildung 3.44) annähernd dieselben Schlussfolgerungen wie beim Typ Einebene-Einsystem 60.
- Bei den Donau-Geometrien gilt zumeist ein uneingeschränkter Zusammenhang zwischen höheren Leiterseil-Bodenabständen und verringerten Feldstärken bzw. Flussdichten. Dies ist für den Typ **Donau 62** in den Abbildungen 3.45 und 3.46 zu sehen. Ebenso verhält es sich bei der elektrischen Feldstärke des Typs **Donau 74** (Abbildung 3.48), während es bei der magnetischen Flussdichte desselben Typs einen Bereich weniger Meter beiderseits der Trassenachse gibt, in dem die Erhöhung von 7 auf 9 m einen gegenteiligen Effekt hat (Abbildung 3.47). Noch extremer ist dies beim Typ **Donau 106**: Hier gibt es einen Bereich weniger Meter beiderseits der Trassenachse, in dem die niedrigsten Flussdichtewerte bei $h_{\min} = 9$ m auftreten, gefolgt von 7, 15, 11 und 13 m (Abbildung 3.49). All dies spielt sich jedoch in der Umgebung von 2 μ T ab. In allen übrigen Bereichen gilt die oben beschriebene Verringerung der Flussdichte mit steigendem Leiterseil-Bodenabstand; dasselbe gilt uneingeschränkt für die elektrische Feldstärke (Abbildung 3.50). Bei allen drei Donau-Geometrien ist jenseits der 30 m von der Trassenachse weder bei der elektrischen Feldstärke noch bei der magnetischen Flussdichte ein nennenswerter Einfluss des Leiterseil-Bodenabstands auszumachen.
- Auch beim Typ **Einebene-Zweisystem 100** gibt es einen kleinen Bereich weniger Meter um die Trassenachse herum, in dem eine Erhöhung der Leiterseile eine Flussdichteerhöhung mit sich bringen kann. In den übrigen Bereichen gilt dagegen, dass ein größerer Leiterseil-Bodenabstand zu geringeren Flussdichtewerten führt (Abbildung 3.51). Bei der elektrischen Feldstärke dagegen bringt eine Erhöhung der Leiterseile nur innerhalb von etwa 25 m beiderseits der Trassenachse eine Verringerung, außerhalb dessen dagegen eine Erhöhung mit sich (Abbildung 3.52). Während bei mehr als etwa 30 m Abstand von der Trassenachse keine nennenswerte Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte vom Leiterseil-Bodenabstand mehr zu beobachten ist, ist dies bei der elektrischen Feldstärke, wenngleich auf sehr geringem absolutem Niveau, durchaus noch der Fall.
- Beim Typ **Tanne 45** bewirkt eine Erhöhung des Leiterseil-Bodenabstands stets eine Verringerung der magnetischen Flussdichte mit sich, wobei dieser Effekt nur innerhalb von 30 m Abstand zur Trassenachse signifikant ist (Abbildung 3.53). Bei der elektrischen Feldstärke hingegen gilt dies nur innerhalb von etwa 15 m beiderseits der Trassenachse – außerhalb dieses Bereiches kehrt sich dieser Zusammenhang zunächst um, um dann bei ca. 45 m Abstand von der Trassenachse zu seiner ursprünglichen Reihung zurückzukehren (Abbildung 3.54).
- Beim Typ **Tonne 30** gilt eine uneingeschränkte Verringerung der magnetischen Flussdichte (Abbildung 3.55) und der elektrischen Feldstärke (Abbildung 3.56) bei höheren Leiterseil-Bodenabständen, auch wenn die Unterschiede im Falle der elektrischen Feldstärke mancherorts sehr gering ausfallen.
- Bei den beiden viersystemigen Anordnungen herrschen recht ähnliche Verhältnisse: Eine Erhöhung des Leiterseil-Bodenabstands führt beim Typ **Einebene-Donau-Viersystem 121** stets zu einer Verringerung der magnetischen Flussdichte (Abbildung 3.57). Beim Typ **Einebene-Viersystem 102** gilt dies mit Ausnahme eines Bereiches weniger Meter um die Trassenachse herum (Abbildung 3.59). In beiden Fällen ist jenseits von etwa 40 m Abstand von

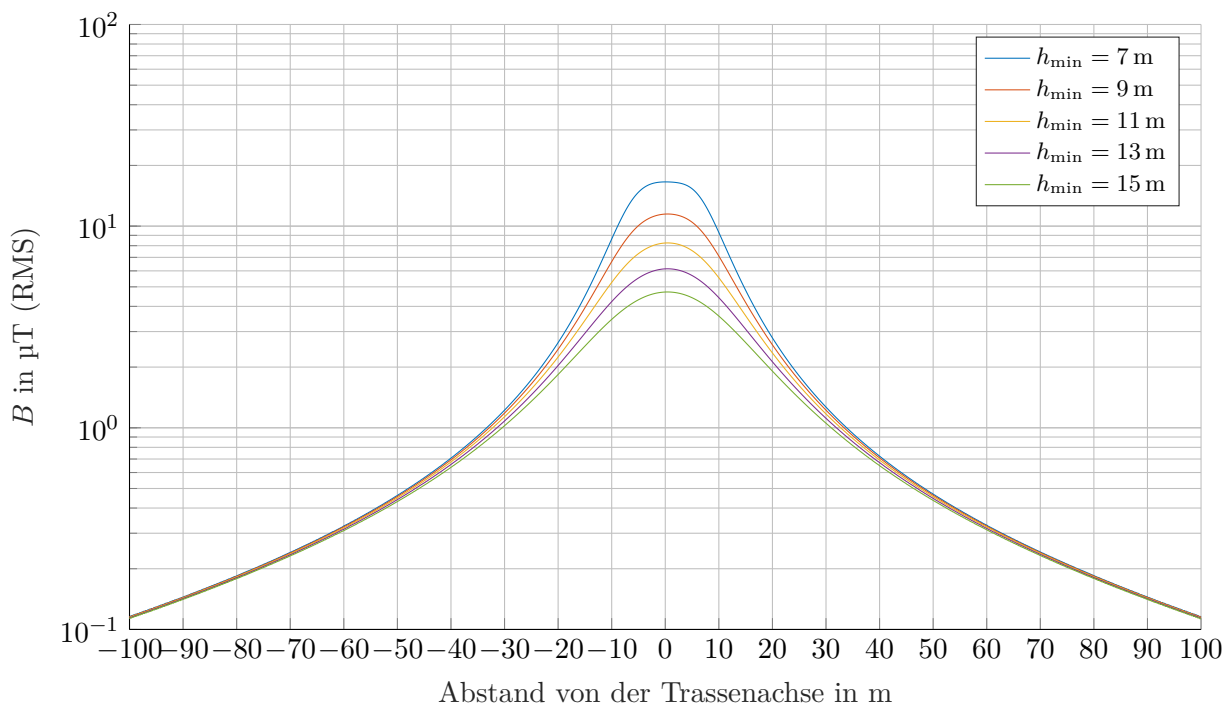


Abbildung 3.41: Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Ein-system 60

der Trassenachse kein nennenswerter Einfluss mehr festzustellen. Bei der elektrischen Feldstärke gibt es bei beiden Typen einen Punkt in etwa 30 m Abstand von der Trassenachse, ab dem ein Höhersetzen der Leiterseile zu höheren Feldstärken führt (Abbildungen 3.58 und 3.60). Innerhalb dieses Abstandes dagegen sind höher liegende Leiterseile mit einer geringeren elektrischen Feldstärke verbunden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine Masterhöhung so gut wie immer eine Verringerung der magnetischen Flussdichte mit sich bringt; eine Ausnahme stellt bei einigen Masttypen lediglich der Bereich weniger Meter um die Trassenachse herum dar. Allerdings ist dieser Minderungseffekt außerhalb von etwa 30 m von der Trassenachse vernachlässigbar gering. Bei der elektrischen Feldstärke bringt bei einigen Geometrien die Masterhöhung zumindest in einem Teil des betrachteten Querschnitts höhere Feldstärken mit sich, was im Einklang zur Feststellung der 26. BImSchVVwV steht. Vor dem Hintergrund, dass eine Minimierungsmaßnahme nicht in Frage kommt, wenn sie zu höheren Immissionen an einem maßgeblichen Minimierungsort führen würde (Abschnitt 3.1 der 26. BImSchVVwV), kommt die Feldminimierung durch Masterhöhung nur in denjenigen Fällen in Frage, in denen die Erhöhung an allen maßgeblichen Minimierungsorten sowohl eine niedrigere magnetische Flussdichte als auch eine niedrigere elektrische Feldstärke bewirkt. Eine Ausnahme stellen dabei solche Fälle dar, in denen das elektrische Feld nicht beachtet werden muss, weil es beispielsweise durch ein Gebäude abgeschirmt wird.

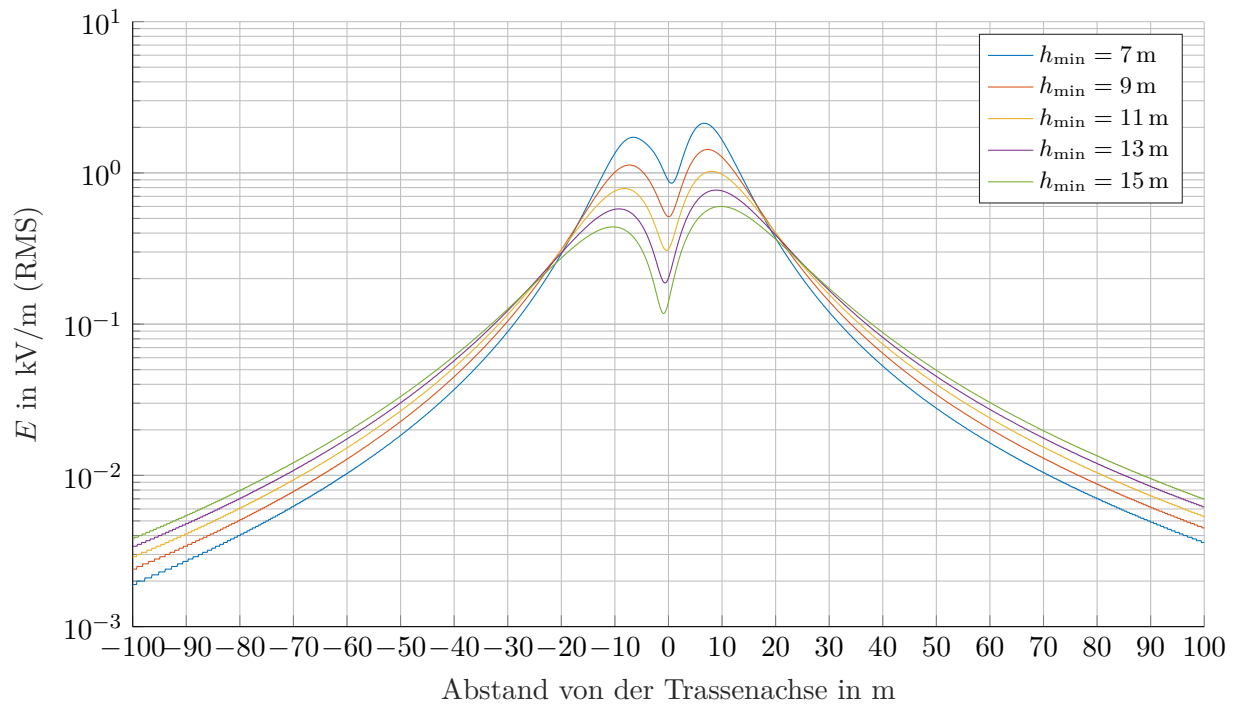


Abbildung 3.42: Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Einebene-Einsystem
60

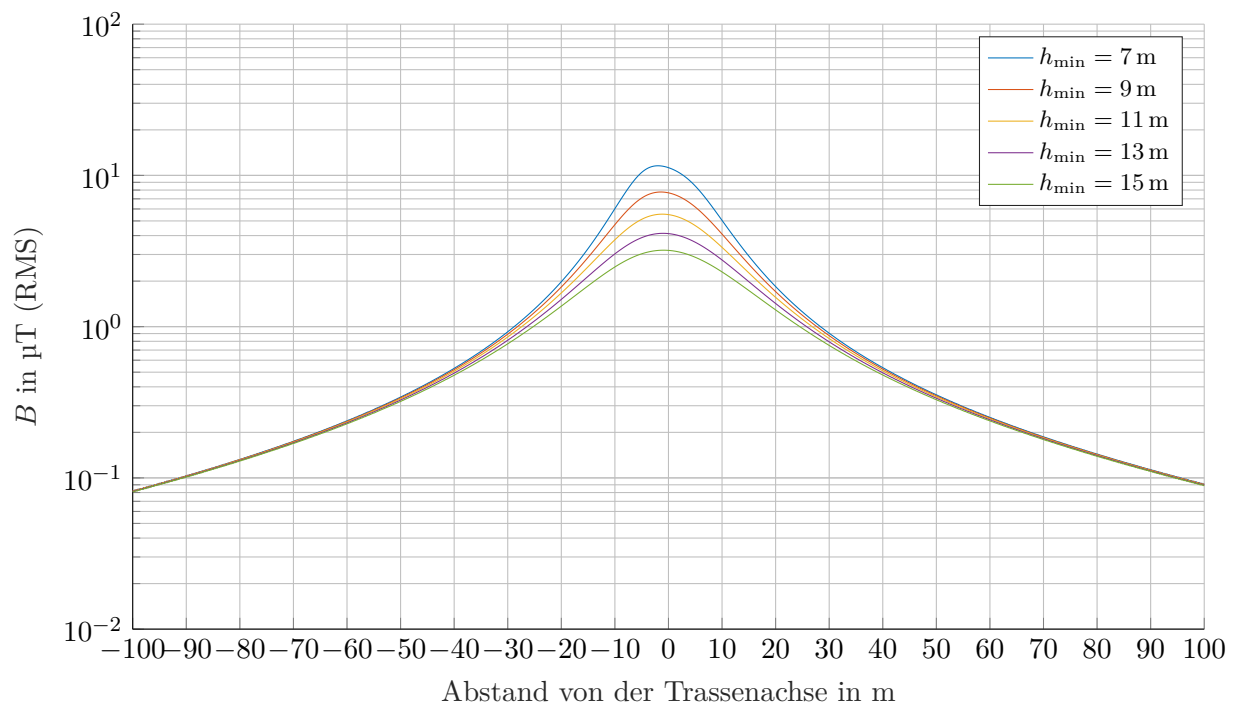


Abbildung 3.43: Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Wetterfichte 43

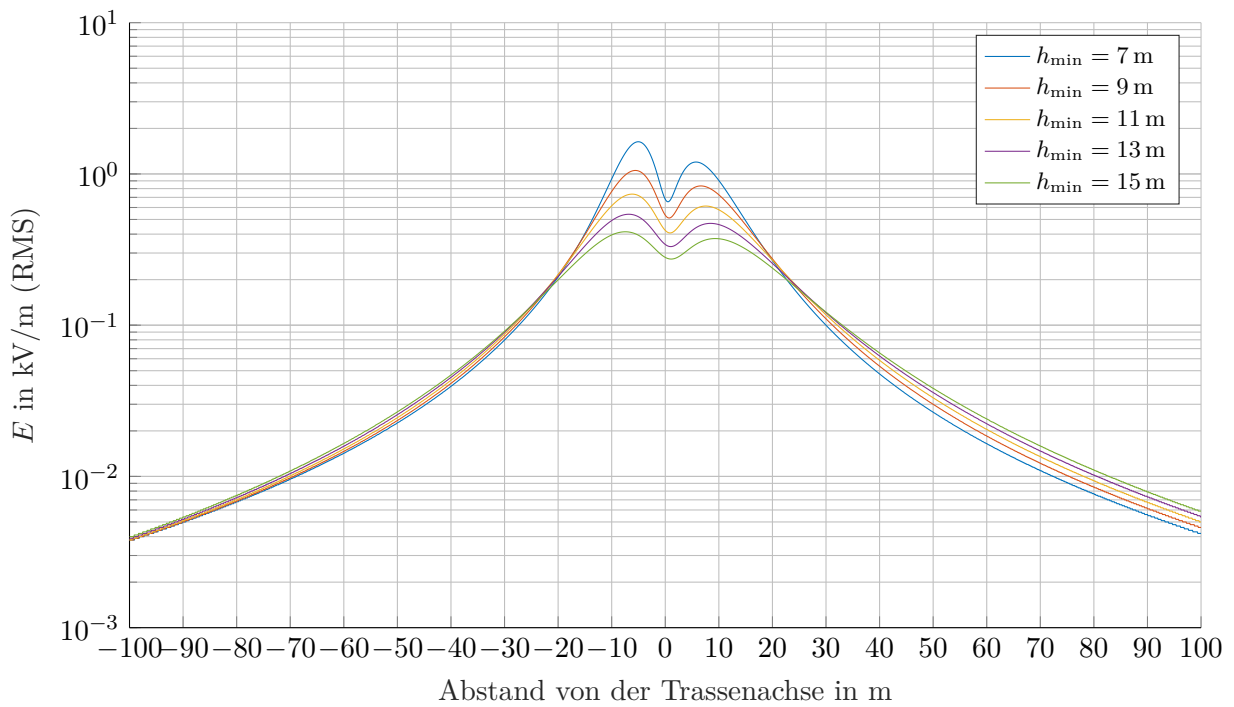


Abbildung 3.44: Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Wetterfichte 43

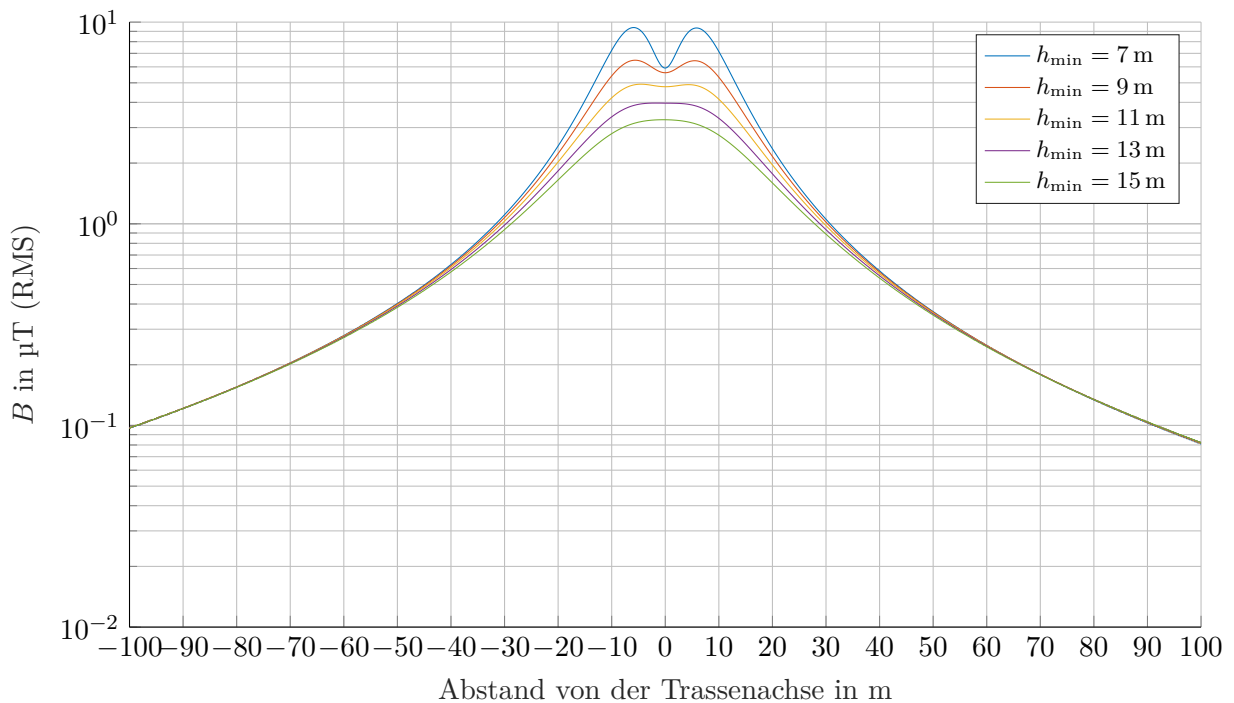


Abbildung 3.45: Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Donau 62

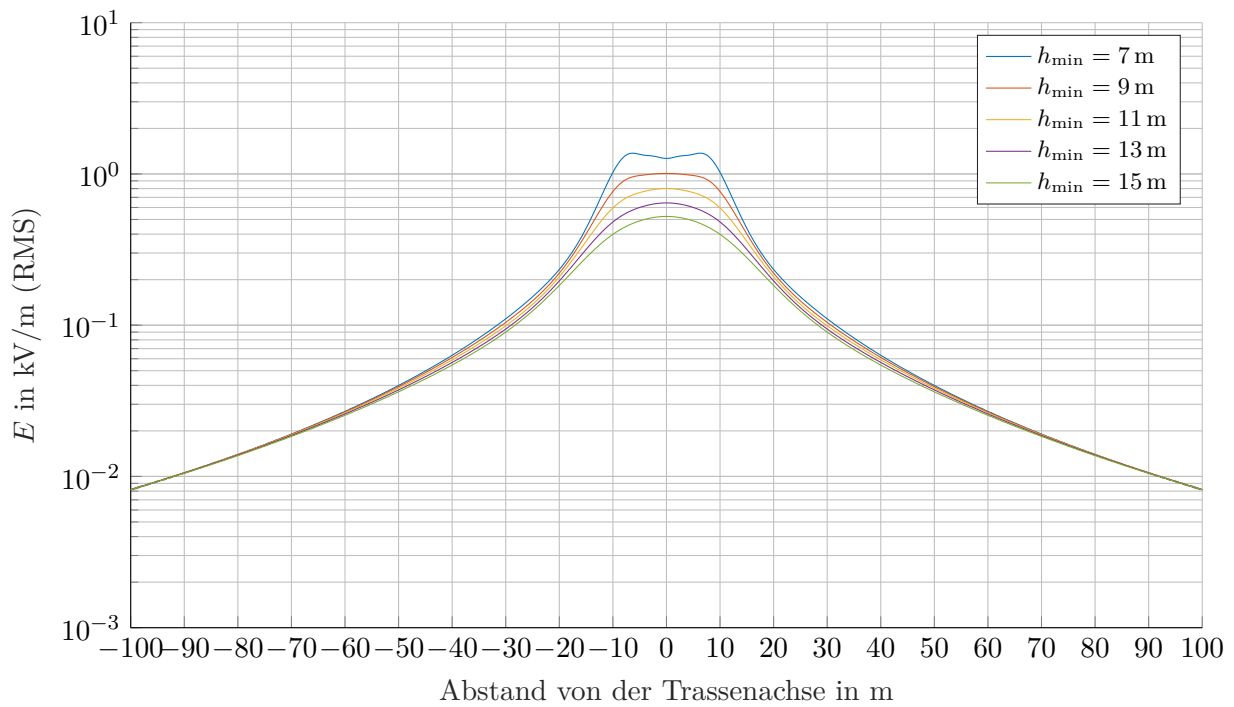


Abbildung 3.46: Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Donau 62

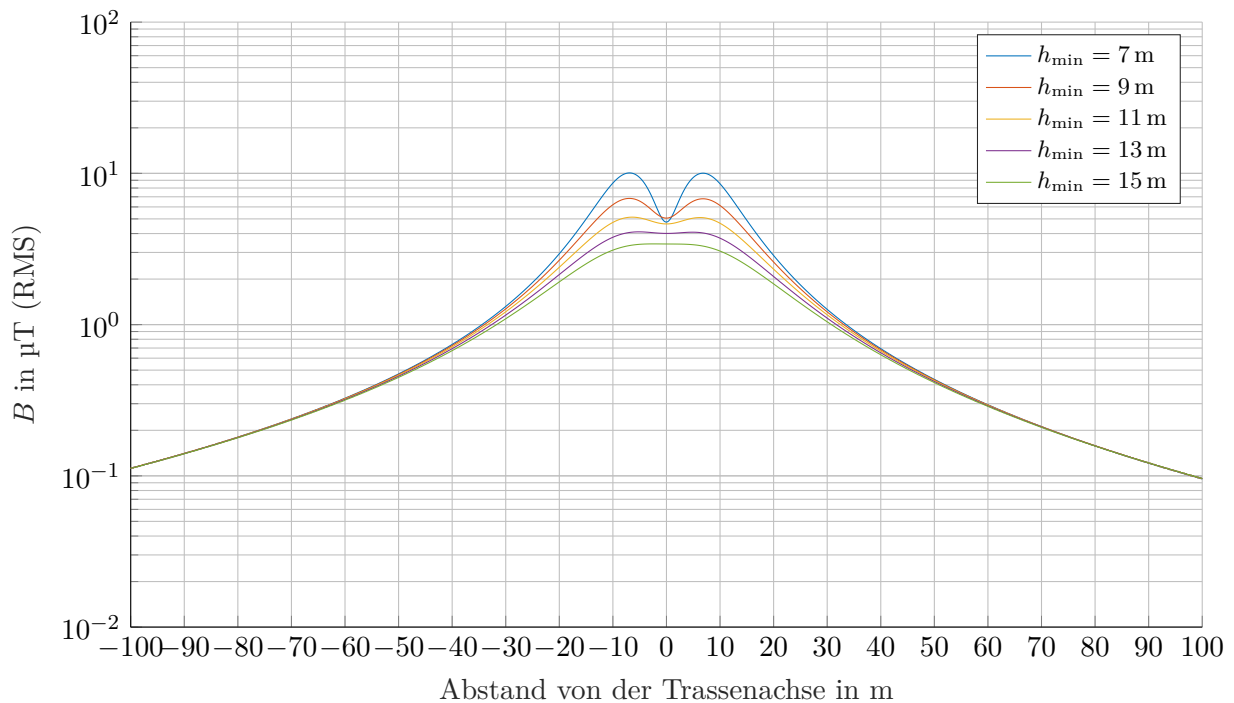


Abbildung 3.47: Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Donau 74

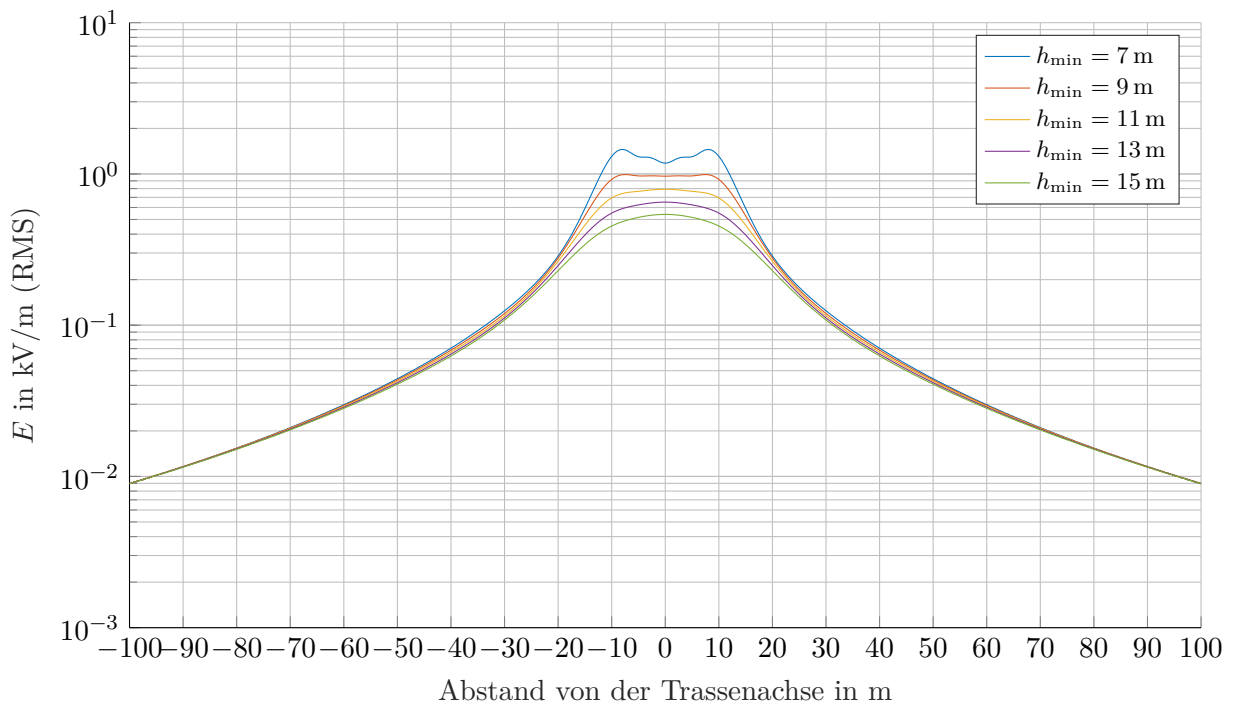


Abbildung 3.48: Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Donau 74

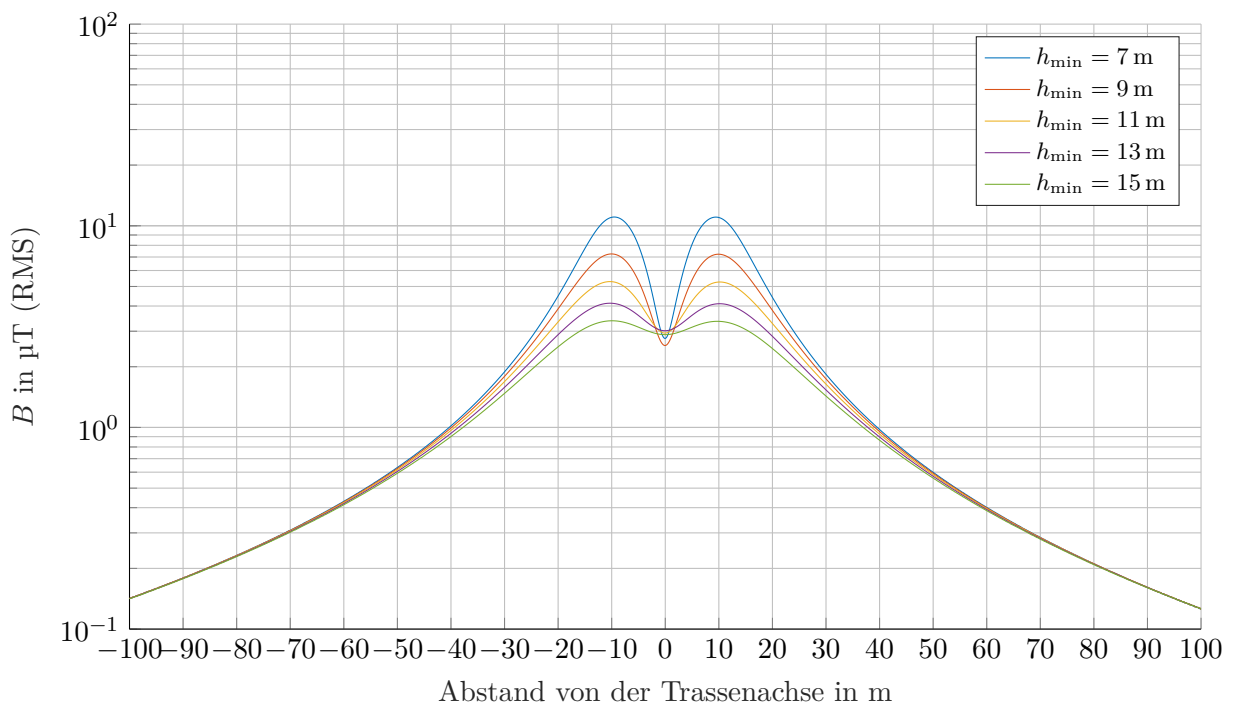


Abbildung 3.49: Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Donau 106

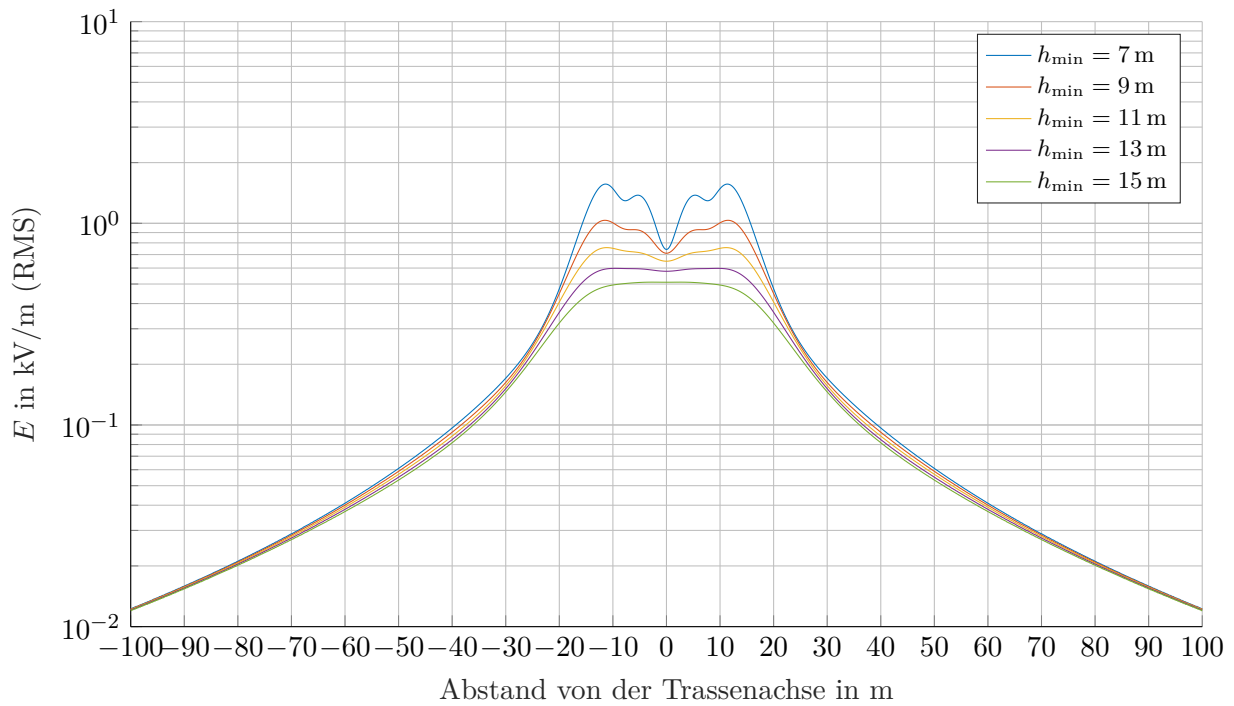


Abbildung 3.50: Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Donau 106

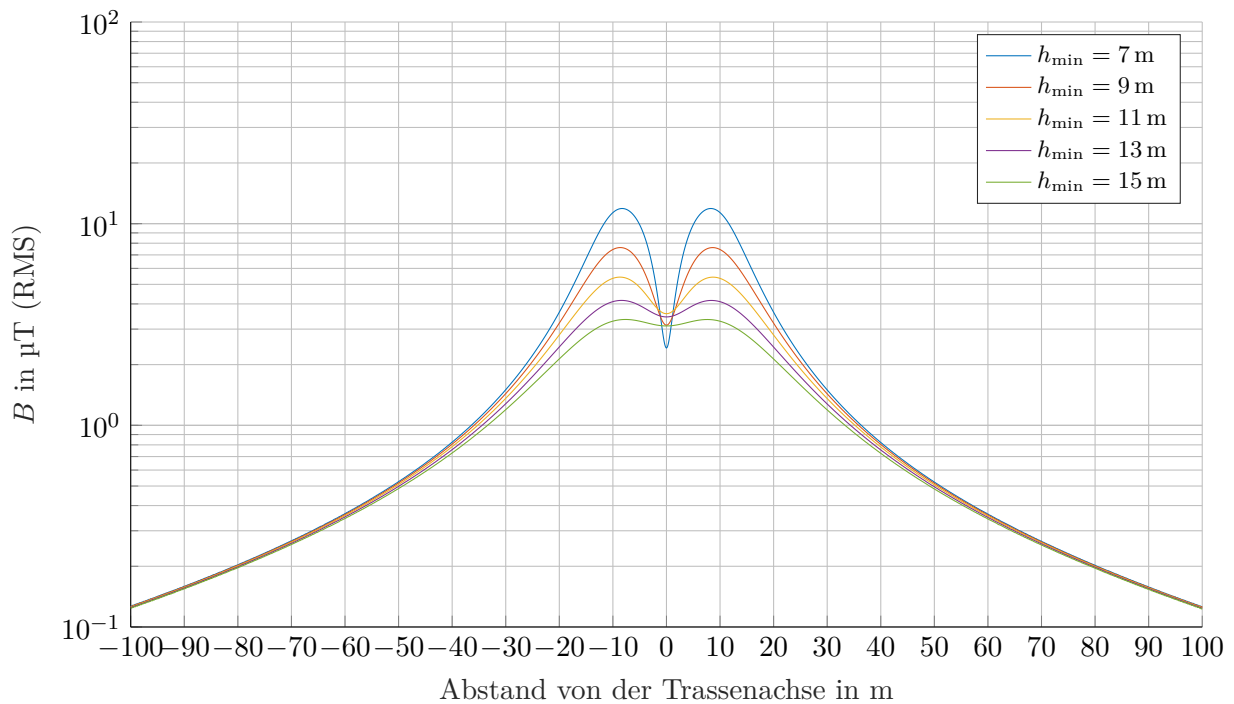


Abbildung 3.51: Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Zweissystem 100

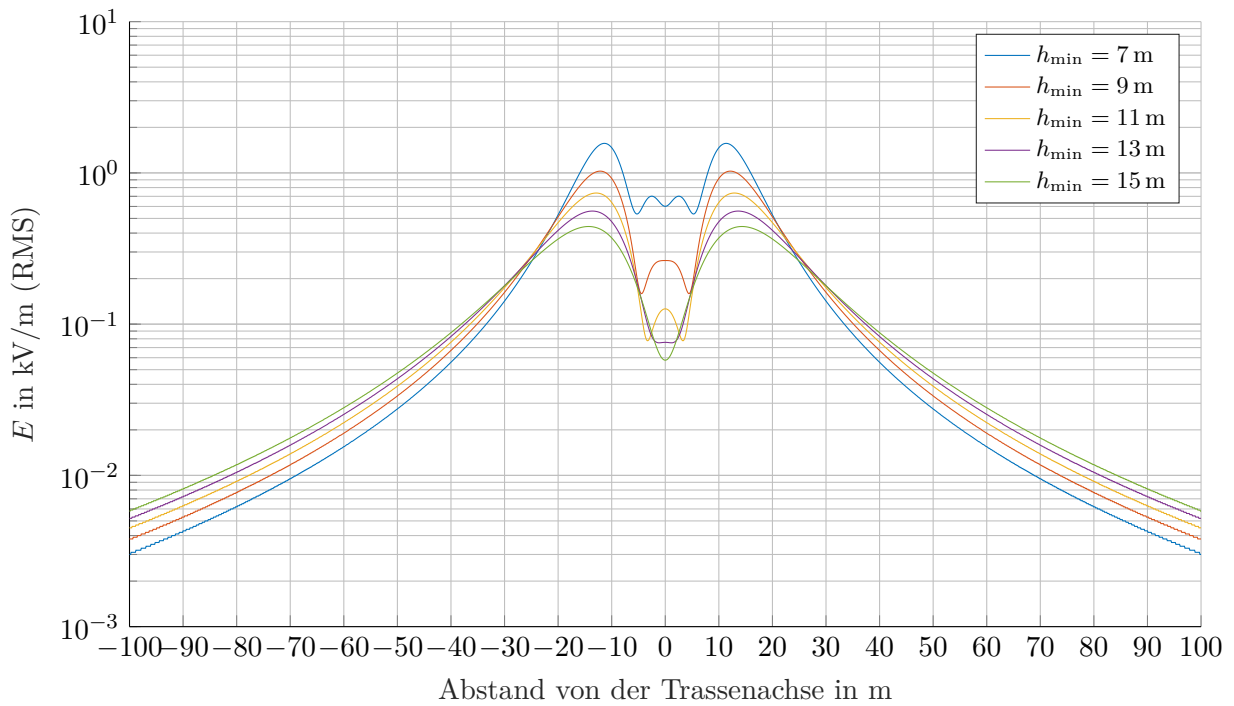


Abbildung 3.52: Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Einebene-Zweissystem 100

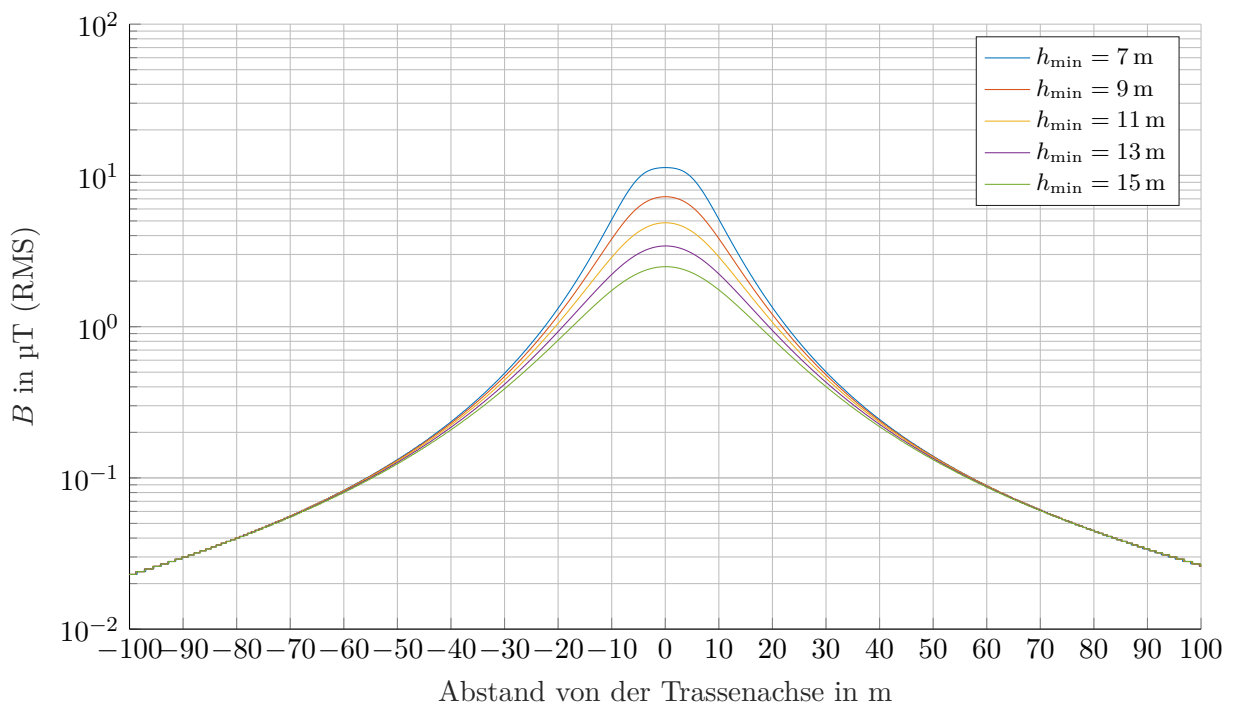
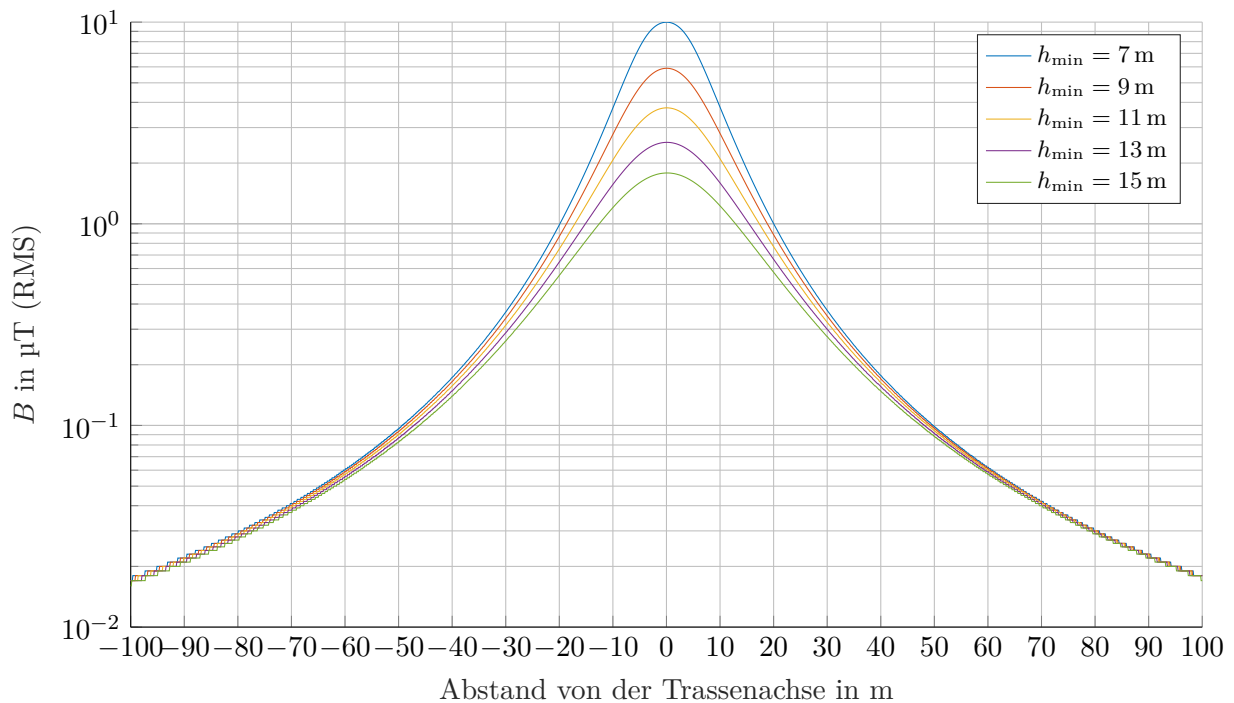
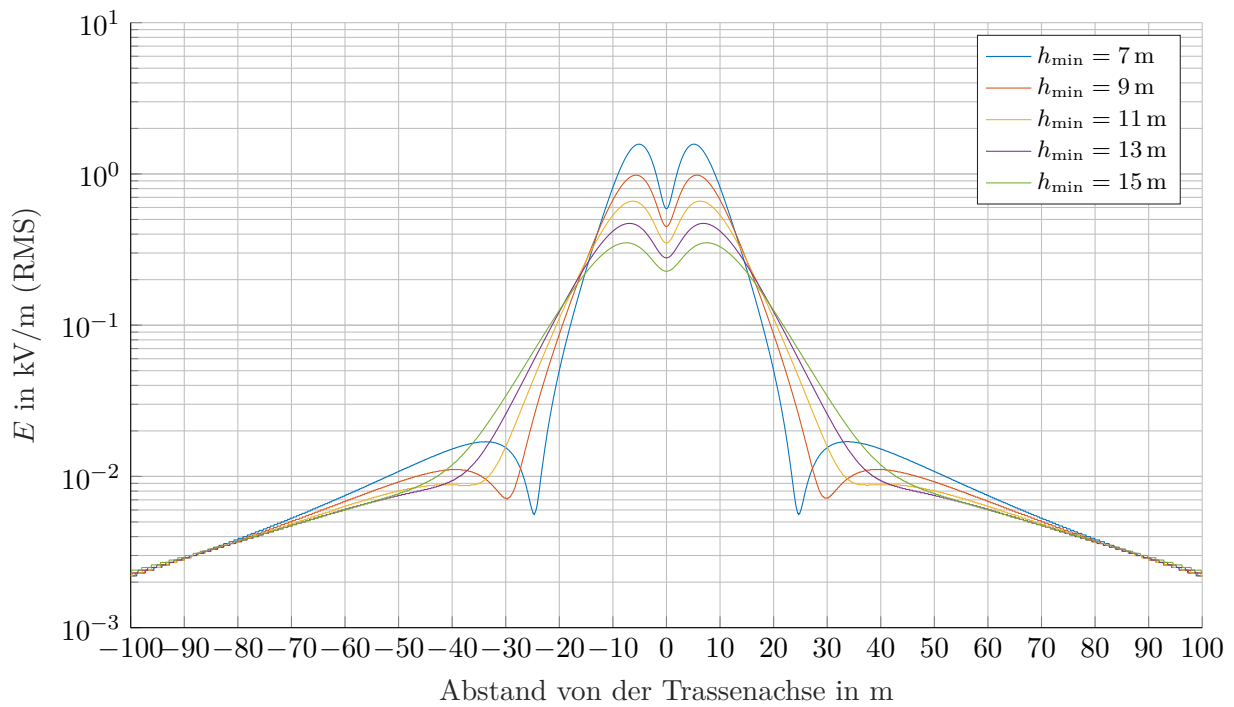


Abbildung 3.53: Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Tanne 45



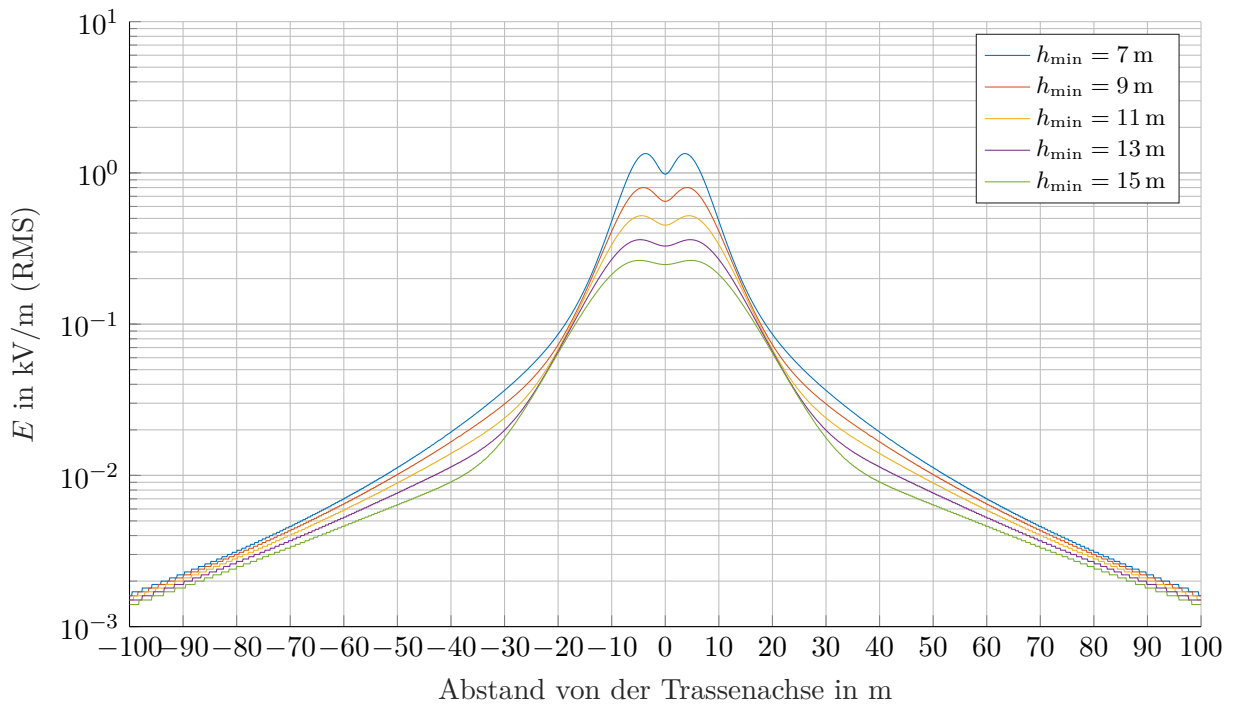


Abbildung 3.56: Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Tonne 30

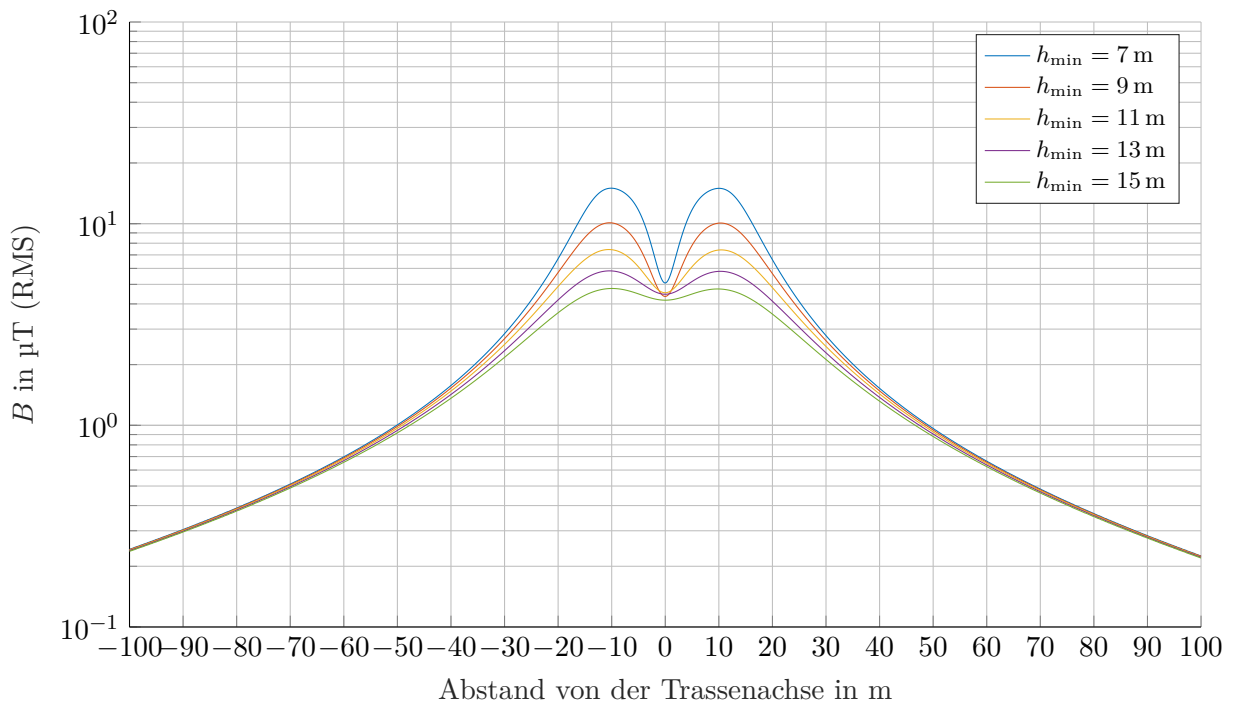


Abbildung 3.57: Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121

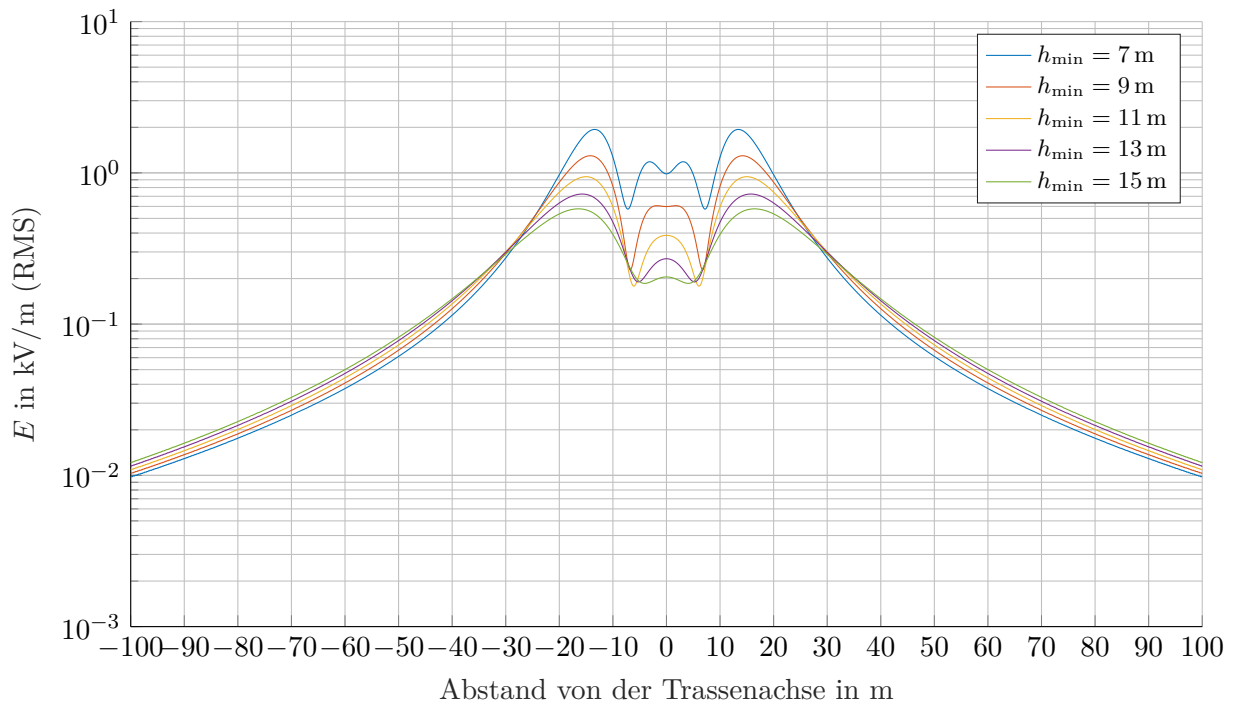


Abbildung 3.58: Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121

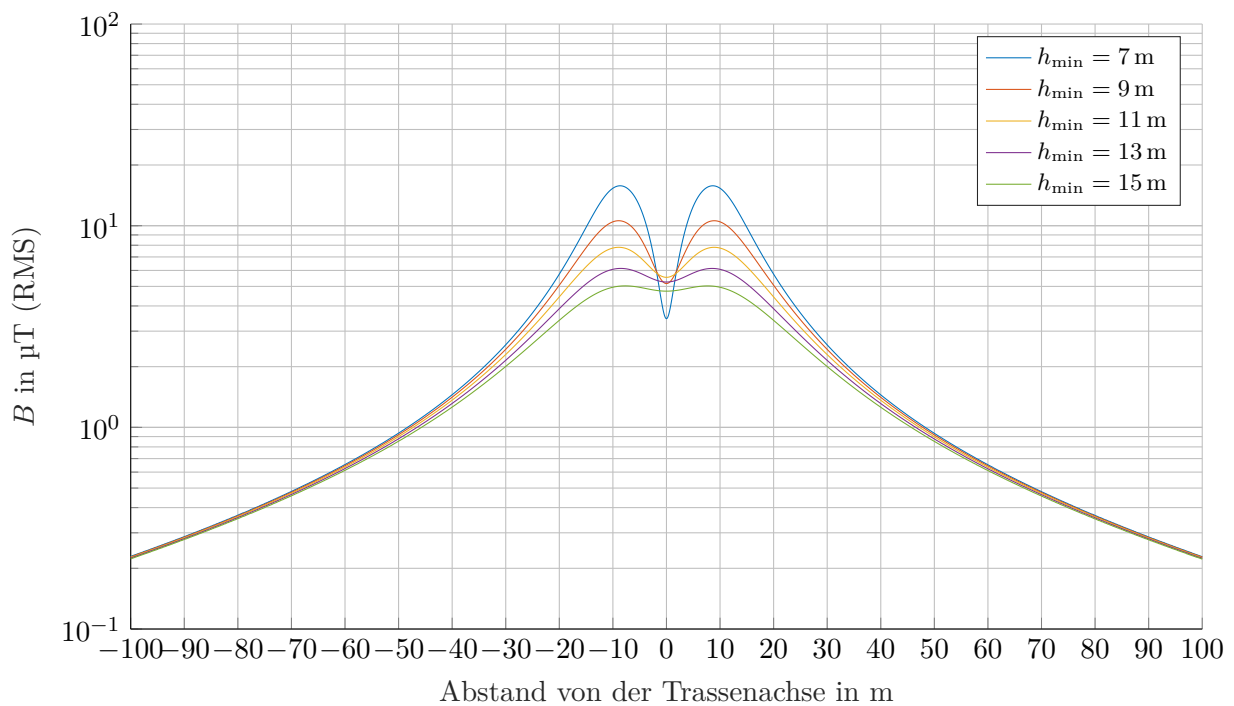


Abbildung 3.59: Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Viersystem 102

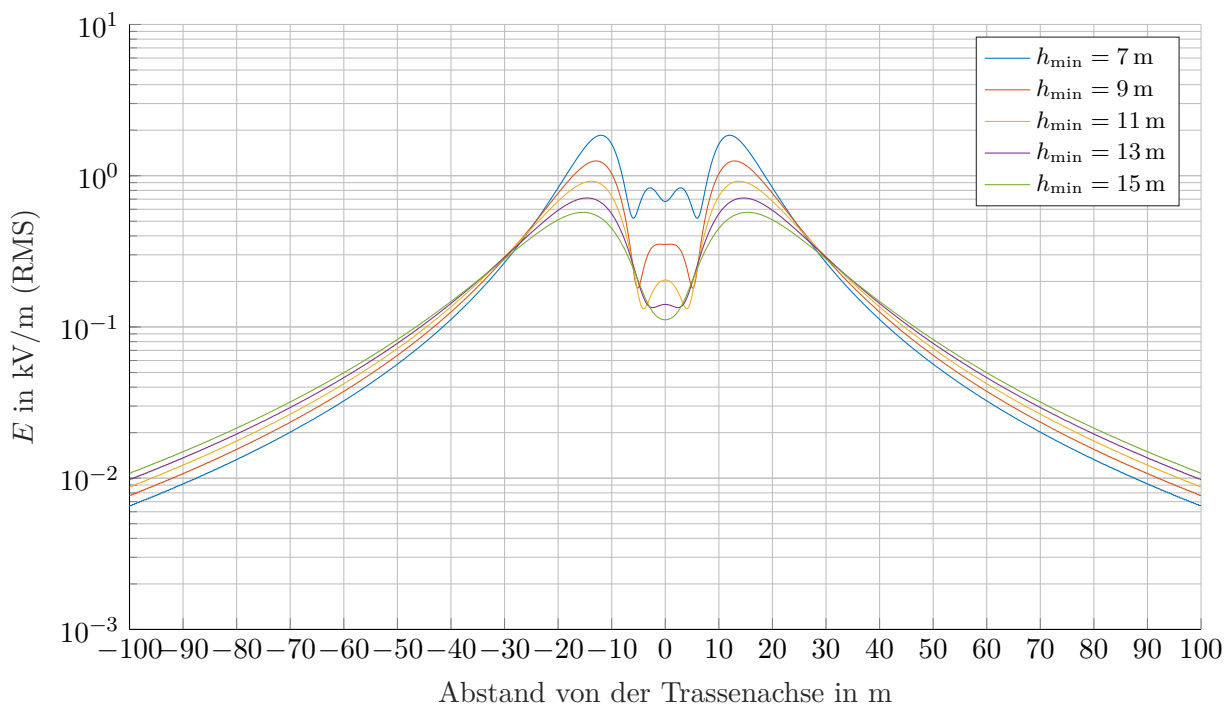


Abbildung 3.60: Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Einebene-Viersystem 102

3.1.2.2 Auswirkungen auf Vogelschutz, Landschaftsbild und Flächenverbrauch

Bei Fragestellungen der Erhöhung von Freileitungen ist auch der Vogelschutz zu beachten. Dabei ist grundsätzlich zwischen zwei Effekten zu unterscheiden.

1. Von der **anlagebedingten Mortalität durch Leitungskollision** sind vor allem solche Vögel betroffen, die die Leitungen nicht oder zu spät wahrnehmen und mit diesen kollidieren. „Die Kollisionsgefährdung ist artspezifisch verschieden [...] und wird durch ungünstige Witterungsbedingungen wie z. B. Nebel, Regen, Schneefall oder starken Wind zusätzlich beeinflusst. Auch wenn eine Reduzierung des Kollisionsrisikos durch Vogelschutzmarker möglich ist, ist nicht für alle Arten oder Artengruppen von derselben Wirksamkeit der Marker auszugehen“ ([22] Abschnitt 3.2). Ein Projekt des Bundesamtes für Naturschutz zur Untersuchung innovativer 380-kV-Freileitungsmastsysteme kam zu folgendem Schluss: „Die verringerte Masthöhe der innovativen Masten (27,6 – 36,1 m) kann das Kollisionsrisiko für Arten senken, die unabhängig von der Witterung und Topografie in einer kollisionskritischen bezogen auf konventionelle Mastsysteme fliegen. Eine Minderung des Kollisionsrisikos ist dabei für Brut- und Gastvögel sowie ziehende Arten möglich [...]“ ([23] Abschnitt 5.5).
2. Zudem existiert eine **anlagenbedingte Störwirkung (Kulissenwirkung)**. Dies bedeutet, „die partielle Meidung von Habitaten durch eine Kulissenwirkung von Freileitungen auf Vögel des Offenlandes. [...] Je niedriger eine Leitung, umso geringer fällt auch der Kulisseneffekt in der Fläche aus [...]“ ([22] Abschnitt 3.3).

Es ist daher zu vermuten, dass die Erhöhung von Masten auch in der 110-kV-Spannungsebene nachteilige Auswirkungen auf den Vogelschutz hat.

Abgesehen davon bringen höhere Maste aufgrund des größeren Materialaufwandes höhere Kosten mit sich. Dasselbe gilt für die notwendigen stärkeren Fundamente, wobei letztere außerdem zu einem höheren Flächenverbrauch führen. Ferner wird durch höhere Maste das Landschaftsbild beeinträchtigt, wie das Bundesverwaltungsgericht festgestellt hat⁶: *„Schon daher begründet die Norm [die 26. BImSchVVwV, Anmerkung des Verfassers] keinen zwingenden Vorrang einer Minimierung elektromagnetischer Felder, wenn diese in Konflikt zu anderen Zielen mit Gesetzesrang gerät: So vergrößern höhere Masten stets den Bodenabstand der Leiterseile und minimieren die elektromagnetischen Felder, beeinträchtigen aber zugleich das Landschaftsbild (§ 14 Abs. 1 BNatSchG) und bedrängen optisch die umliegende Bebauung. Ähnliches gilt für Maßnahmen der elektrischen Schirmung, wenn auf zusätzlichen Traversen Leiterseile geführt werden“.*

3.1.2.3 Verkürzung der Spannfeldlänge

Bei der Abstandsoptimierung durch Verringerung der Spannfeldlänge sind zwar keine Auswirkungen auf den Vogelschutz zu erwarten, allerdings führt diese nur in einzelnen Abschnitten des Leitungsverlaufs zu einer (relativ geringen) Erhöhung der Leiterseile und dadurch, wenn überhaupt, auch nur zu einer geringen Minderung der Feldstärken. Durch die zusätzlichen Maste entstehen nicht nur höhere Bau- und Unterhaltskosten, sondern es werden auch weitere Maststandorte benötigt, die eine Beeinträchtigung der betroffenen Grundstückseigentümer darstellen und darüber hinaus weitere Kosten aufgrund der zusätzlich fälligen Entschädigungen nach sich ziehen. Insgesamt erscheint daher die Verhältnismäßigkeit dieser Minimierungsmaßnahme, sowohl im Hinblick auf höhere Masten als auch auf kürzere Spannfeldlängen, fraglich.

3.1.2.4 Führung eines Stromkreises auf der abgewandten Traverse

Zu der von der 26. BImSchVVwV erwähnten Minimierungsmaßnahme des Führens eines Stromkreises auf einer vom maßgeblichen Minimierungsort abgewandten Traverse sei angemerkt, dass dies bei zwei- und viersystemigen Mastgeometrien aufgrund des in sehr guter Näherung achsensymmetrischen Verlaufs der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte nutzlos wäre. Alleine bei einsystemigen Mastgeometrien, wo die elektrische Feldstärke mehr noch als die magnetische Flussdichte eine Asymmetrie aufweist, könnte diese Minimierungsmaßnahme durch spiegelverkehrte Aufstellung der Masten durchgeführt werden. Dies würde sich allerdings auf den gesamten Verlauf der Freileitung auswirken, sodass möglicherweise im weiteren Leitungsverlauf eine Feldstärkeerhöhung an einem anderen maßgeblichen Minimierungsort die Folge wäre.

In wenigen Fällen werden Freileitungen mit zweisystemigen Mastgeometrien errichtet, wobei aber nur eines der Systeme mit Leiterseilen belegt und in Betrieb genommen wird. Hier wäre es grundsätzlich möglich, dieses Drehstromsystem abwechselnd auf der einen oder auf der anderen Seite des Mastes zu führen, sodass es sich, zumindest im Falle nur einseitig vorhandener maßgeblicher Minimierungsorte, auf der von diesen abgewandten Mastseite befände. In der Praxis dient die Vor-

⁶BVerwG, Urteil vom 14. März 2018 – 4 A 5/17 –, BVerwGE 161, 263, Rz. 49.

gehensweise der einseitigen Belegung zweisystemiger Mastgeometrien dazu, sich einen Ausbau des zweiten Systems zu einem späteren Zeitpunkt offenzuhalten. Befindet sich das vorhandene Drehstromsystem abwechselnd auf beiden Mastseiten, so würde die Nachrüstung eines zweiten Systems zu einer Überkreuzung der Leiterseile und damit zu einem Kurzschluss führen. Diese Minimierungsmaßnahme ist damit auszuschließen.

3.1.3 Elektrische Schirmung

Die 26. BImSchVV schreibt dazu in ihrem Abschnitt 5.3.1.2:

„Elektrisch leitfähige Schirmflächen oder -leiter werden vorzugsweise zwischen den spannungsführenden Leitungsteilen und einem maßgeblichen Minimierungsort als Bestandteil der Anlage eingefügt; hierzu zählt auch das Mitführen von Erdleiterseilen.

Voraussetzungen: Die baulichen Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit die zusätzlichen Leitungs- und Zubehöerteile angebracht werden können. Mindestisolierluftstrecken zwischen den Schirmen und den spannungsführenden Leiterseilen und der Mindestbodenabstand müssen eingehalten werden.

Wirksamkeit: Die Maßnahme wirkt überwiegend auf die elektrische Feldstärke. Die Wirksamkeit ist abhängig von der Art und Ausführung, in der Regel aber niedrig. Erdseile haben nur Abschirmwirkung bei Anbringung unterhalb oder seitlich der Leitungssysteme.

Hinweise: Das Einbringen zusätzlicher Seile erfordert in den meisten Fällen wegen zu gewährleistendem Bodenabstand eine Erhöhung des Mastes und damit verbunden eine Überprüfung der Statik und gegebenenfalls bauliche Anpassungen. Der zusätzliche Aufwand ist bei Neubau und wesentlicher Änderung abhängig von der geplanten Ausführung und von der Länge des zu schirmenden Leitungsstücks“.

Sollen die Freileitungsmaste nicht die baulichen Ausmaße von Brückenpfeilern annehmen, kommt nur die Verwendung von (Erd-)leiterseilen zur Schirmung in Frage. Es kann aber durch die Einfügung von Querverbindungen zwischen den Erdseilen eine Art Gitter und damit eine Annäherung an eine Schirmfläche erreicht werden.

3.1.3.1 Physikalischer Hintergrund

Im Bereich der elektrischen Felder ist die Funktion der Abschirmwirkung von Erdseilen unmittelbar einleuchtend (siehe Abschnitt 2.4). Zwar wäre nur mit einer durchgehenden, metallischen Schirmfläche eine vollständige Abschirmung des elektrischen Feldes möglich, doch ist im Falle einzelner geerdeter Leiterseile zumindest noch mit einer teilweisen Schirmwirkung zu rechnen. Im Falle der Magnetfelder geschieht die Schirmwirkung dadurch, dass die Erdseile über die beiden benachbarten Maste und das Erdreich eine Induktionsschleife bilden ([20] Abschnitt B Kapitel 3.2). Gemäß dem Grundsatz der Induktion und Gegeninduktion (Abschnitt 2.3.2) rufen die einwirkenden Magnetfelder der Leiterseile in den Erdseilen Ströme hervor, deren Magnetfelder den ursprünglich einwirkenden entgegengerichtet sind und dadurch eine Verringerung des gesamten Magnetfeldes bewirken.

Die Schirmwirkung der Erdseile ist dann am größten, wenn die vektorielle Richtung des Magnetfeldes senkrecht zur Schleifenfläche steht. In diesem Falle bedeutet dies, dass die Erdseile dort anzubringen sind, wo die zum Erdboden parallele Komponente der magnetischen Flussdichte ihr Maximum aufweist [20]. Der Verlauf der magnetischen Flussdichte und ebenso ihrer Komponenten im Raum ist aber abhängig von der Phasenordnung, die, wie oben beschrieben, aus betrieblichen Gründen im Verlauf einer Leitung wechseln kann. Ebenso ändert sich der Verlauf der magnetischen Flussdichte bei umgekehrter Lastflussrichtung. Es können daher keine allgemeingültigen, optimalen Stellen für die Anbringung der Erdseile angegeben werden.

3.1.3.2 Modellierung der Erdseile

Sollen unterhalb der Leiterseile eines Freileitungsmasts Erdseile mitgeführt werden, so muss der Mast eine zusätzliche Traverse zur Aufnahme derselben aufweisen. Weiterhin ist zu beachten, dass die Erdseile zu den Leiterseilen einen gewissen Mindestabstand aufweisen müssen, um auch in der Mitte des Spannungsfeldes selbst bei starkem Wind einen ausreichenden Isolationsschutzabstand zu den unter Spannung stehenden Leiterseilen zu wahren. Es sind in Deutschland keine Mastbauformen mit zusätzlich mitgeführten Erdseilen unterhalb der Leiterseile gebräuchlich. Vor diesem Hintergrund sollen zur Untersuchung der Wirksamkeit dieser Minimierungsmaßnahme die beiden im Rahmen dieser Arbeit betrachteten viersystemigen Mastgeometrien Einebene-Donau-Viersystem 121 und Einebene-Viersystem 102 betrachtet werden, bei denen die Leiterseile der jeweils untersten Ebene durch Erdseile ersetzt werden. Da diese Mastbauformen bereits existieren, ist die Einhaltung der Leiterseilabstände und der baustatischen Anforderungen gesichert.

Um die Wirksamkeit der Erdseile beurteilen zu können, werden jeweils die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte in 1 m Höhe über dem Erdboden als Querschnitt durch die Leitungstrasse berechnet, und zwar zum einen mit Erdseilen an der untersten Traverse und zum anderen unter Fortfall dieser Erdseile. Im letzteren Fall sind nur noch die zwei oberen Drehstromsysteme vorhanden. Der Strom durch beide Systeme soll gleichsinnig sein und 500 A betragen. Für die Phasenbelegung wird in beiden Fällen 123 / 123 angenommen. Die Erdseile sollen eine Höhe von 7 m über dem Erdboden haben. Um die Erdseile korrekt in WinField simulieren zu können, wird die automatische Berechnung von Induktionsströmen aktiviert. Die Spannungsfeldlänge zwischen den Masten wird mit 400 m angenommen, was in der 110-kV-Spannungsebene einen typischen Wert darstellt. Der Querschnitt der Leiterseile und der zusätzlichen Erdseile beträgt $380/50 \text{ mm}^2 \text{ Al/St}$ und der des Erdseils an der Mastspitze $97/48 \text{ mm}^2 \text{ Al/St}$.

Da im Falle der Schirmung der Magnetfelder die Induktionsschleife über den Erdboden geschlossen wird, ist anzunehmen, dass der Erdbodenwiderstand Einfluss auf die Stärke der Schirmwirkung haben wird. Die Widerstände der Maste selbst sind dagegen zu vernachlässigen [20]. Der spezifische Bodenwiderstand γ_{Boden} bewegt sich bei einer Frequenz von 50 Hz für Lehm-, Ton- und Humusböden im Bereich von 50 bis $350 \Omega \text{ m}$, für Sandböden im Bereich von 200 bis $2500 \Omega \text{ m}$ und für Kies im Bereich von 2000 bis $3000 \Omega \text{ m}$ ([24] S. 116). Es werden beispielhaft die drei Werte 50, 500 und $5000 \Omega \text{ m}$ betrachtet.

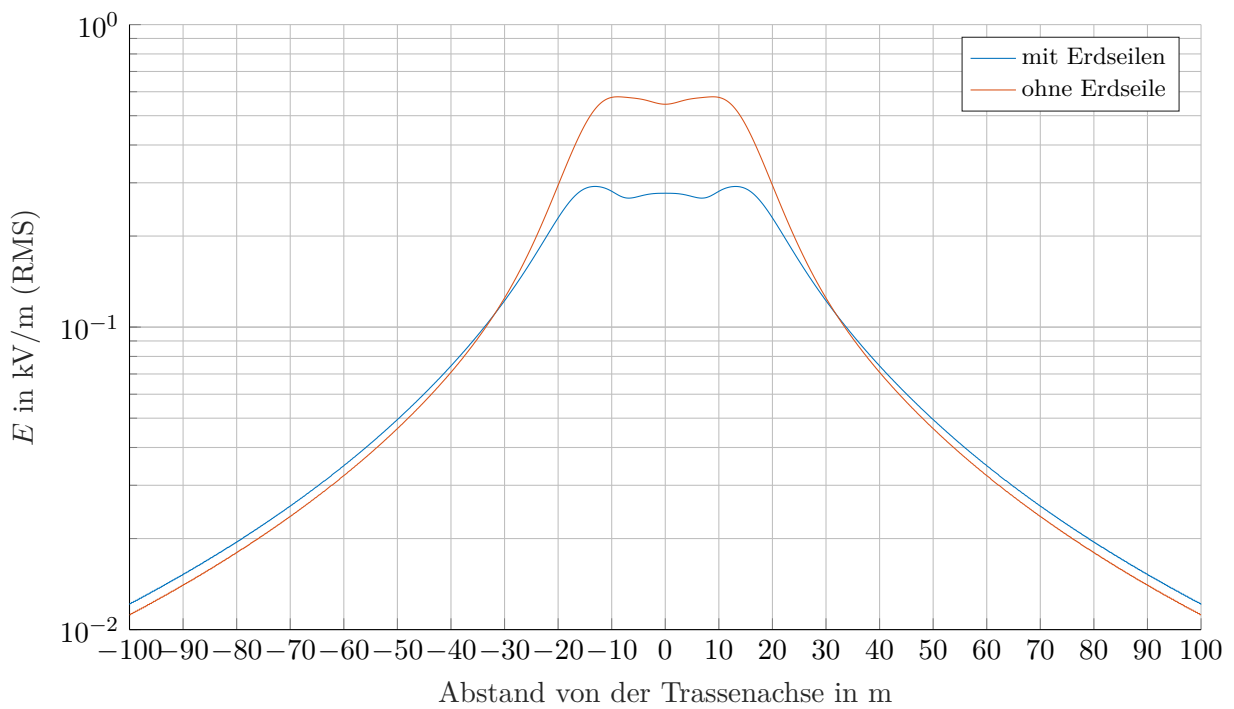


Abbildung 3.61: Elektrische Feldstärke beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 mit zwei Systemen unter Spannung mit/ohne zusätzliche Erdseile

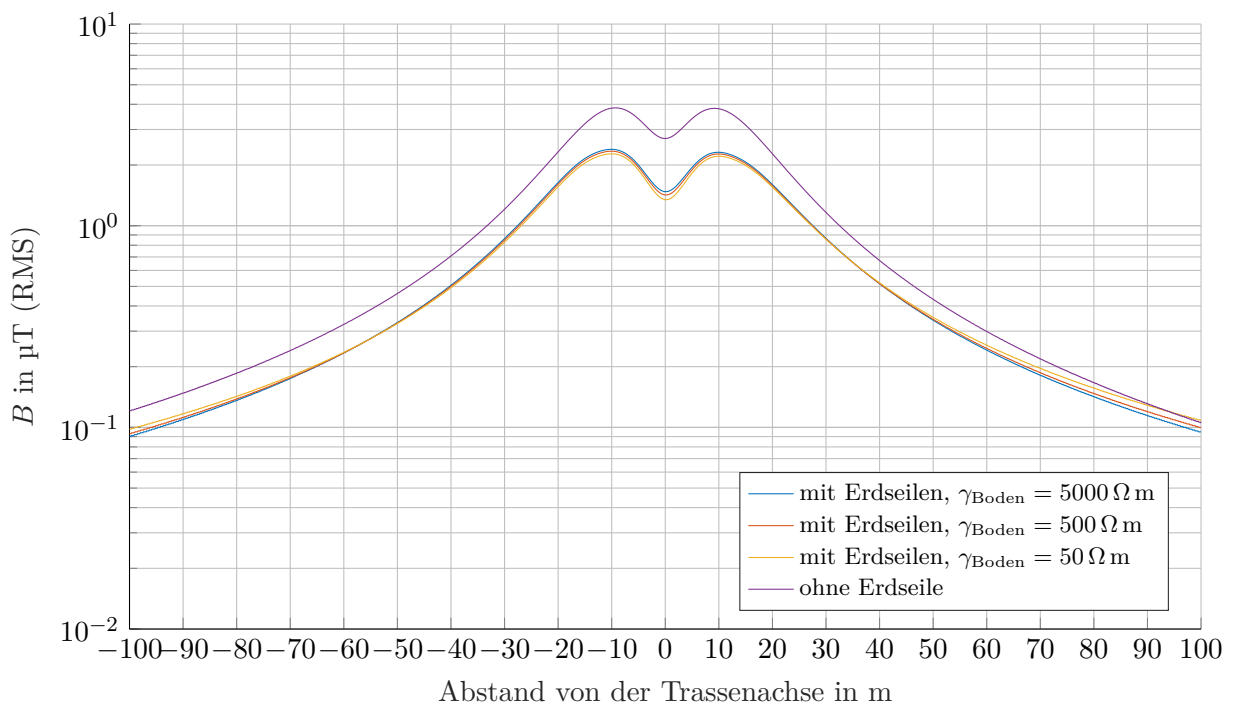


Abbildung 3.62: Magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 mit zwei Systemen unter Spannung mit/ohne zusätzliche Erdseile

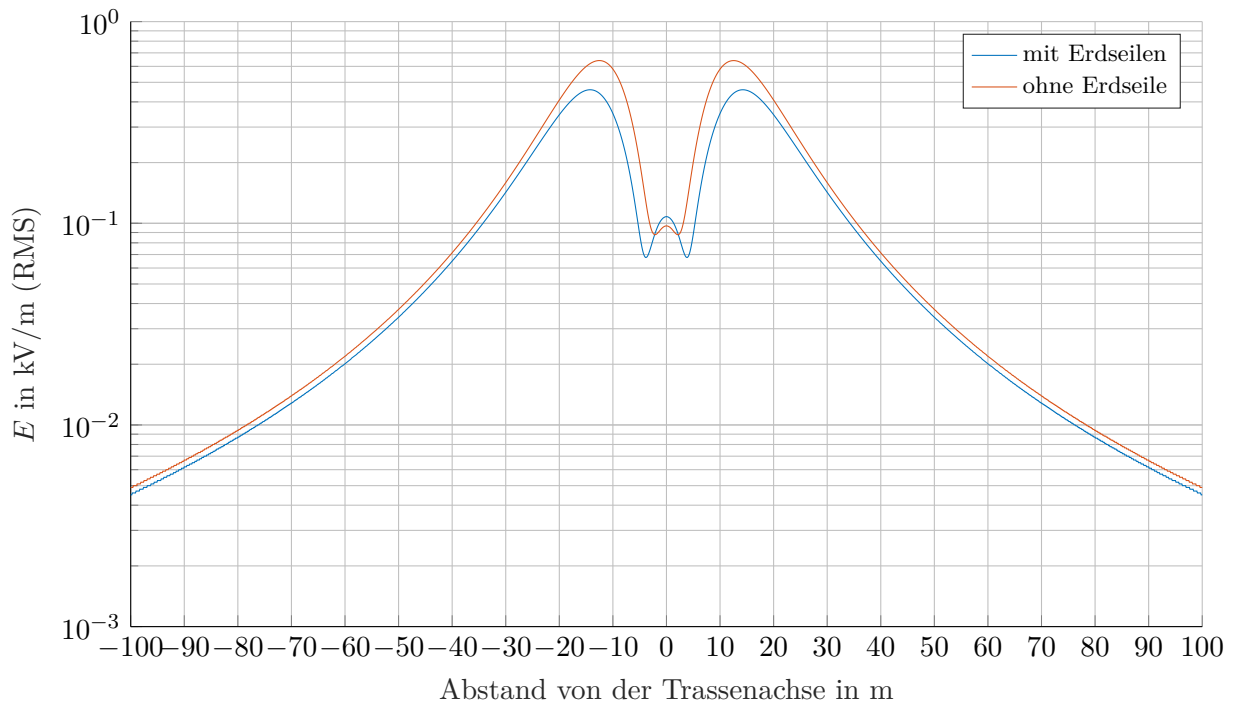


Abbildung 3.63: Elektrische Feldstärke beim Typ Einebene-Viersystem 102 mit zwei Systemen unter Spannung mit/ohne zusätzliche Erdseile

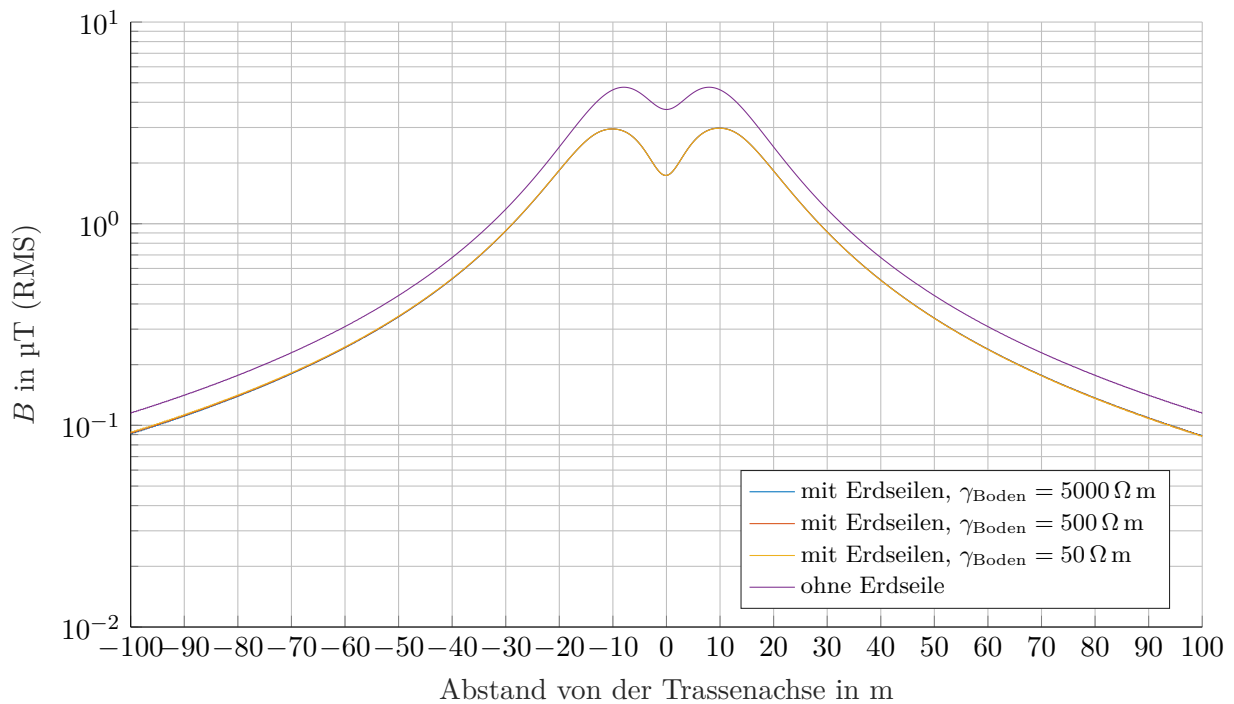


Abbildung 3.64: Magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Viersystem 102 mit zwei Systemen unter Spannung mit/ohne zusätzliche Erdseile

3.1.3.3 Ergebnisse mit Erdseilen

In Abbildung 3.61 ist dargestellt, wie sich das elektrische Feld beim Typ **Einebene-Donau-Viersystem 121** mit und ohne Erdseile verhält. Es ist zu erkennen, dass die Erdseile nur im Bereich von etwa 20 m beiderseits der Trassenachse eine nennenswerte Verringerung der Feldstärke etwa um die Hälfte bewirken. Bei mehr als 35 m Abstand von der Trassenachse ist die Feldstärke mit Erdseilen sogar geringfügig höher als ohne. Die magnetische Flussdichte erfährt bei demselben Masttyp über den gesamten Querschnitt eine gewisse Verringerung (Abbildung 3.62), wobei diese auf der einen Seite der Trasse stärker ausgeprägt ist als auf der anderen. Dies könnte mit der oben erwähnten Abhängigkeit der Schirmwirkung vom Winkel des Vektors der magnetischen Flussdichte an den Erdseilen zusammenhängen. Der Einfluss des Erdbodenwiderstandes ist dabei gering. Beim Typ **Einebene-Viersystem 102** ist der Einfluss der Erdseile auf das elektrische Feld minimal, aber über den gesamten Querschnitt vorhanden (Abbildung 3.63). Die magnetische Flussdichte verringert sich etwas deutlicher, wobei so gut wie kein Einfluss des Erdbodenwiderstandes festzustellen ist (Abbildung 3.64).

3.1.3.4 Modellierung der zusätzlichen Querverbindungen

Neben der von Bauhofer betrachteten Schirmwirkung durch Induktion und Gegeninduktion in einer Leiterschleife bestehend aus einem Erdseil, den Masten und dem Erdreich (siehe oben) ist auch eine Schirmwirkung durch Leiterschleifen aus zwei Erdseilen, die über die Mastgestänge geschlossen werden, denkbar. In diesem Fall wäre, analog zu Bauhofers Überlegungen, die Schirmwirkung dann am größten, wenn die zum Erdboden senkrechte Feldkomponente die Schleife durchsetzt. Der Erdbodenwiderstand spielt in diesem Fall keine Rolle; wohl aber der spezifische Widerstand der Leiterseile. In diesem Zusammenhang könnte eine Verringerung des Schleifenwiderstands und damit womöglich eine Verbesserung der Schirmwirkung erreicht werden, indem die Erdleiterseile in bestimmten Abständen durch Querverbindungen untereinander elektrisch verbunden werden.

Eine solche Anordnung kann in WinField nicht ohne Weiteres simuliert werden, da in diesem Programm alle Leiterseile eines Spannungsfeldes als durchgängige Segmente gleicher Länge modelliert werden, während für die Anbringung einer Querverbindung zwischen Leiterseilen eine Unterteilung der Erdseile erforderlich wäre. In diesem Abschnitt wurde bereits festgestellt, dass der Erdbodenwiderstand fast keinen Einfluss auf die Schirmwirkung der magnetischen Flussdichte hat. Es ist folglich anzunehmen, dass dies, zumindest bei den über den Erdboden geschlossenen Induktionsschleifen, auch für die Verringerung der Spannungsfeldlänge gilt. Da aber an jedem Maststandort eine elektrische Verbindung der Erdseile untereinander über das Mastgestänge erfolgt, kann die Verringerung der Spannungsfeldlänge zur Simulation der Auswirkungen von Erdseil-Querverbindungen innerhalb eines Spannungsfeldes dienen. Es wird dabei in allen Fällen ein spezifischer Bodenwiderstand von $5000 \Omega \text{ m}$ angenommen.

3.1.3.5 Ergebnisse mit zusätzlichen Querverbindungen

In Abbildung 3.65 ist die magnetische Flussdichte für den Typ **Einebene-Donau-Viersystem 121** zum einen für die ursprünglich angenommene Spannungsfeldlänge von 400 m und zum anderen

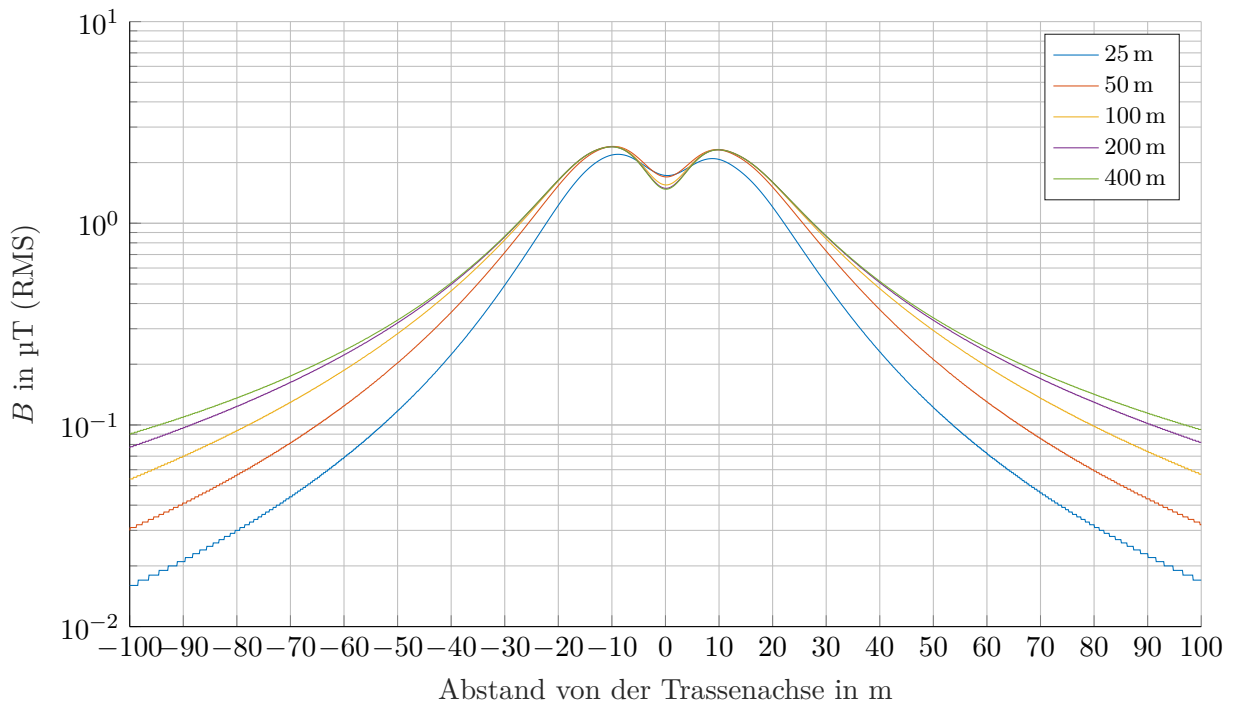


Abbildung 3.65: Magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 mit zusätzlichen Erdseilen unter Veränderung der Spannfeldlänge

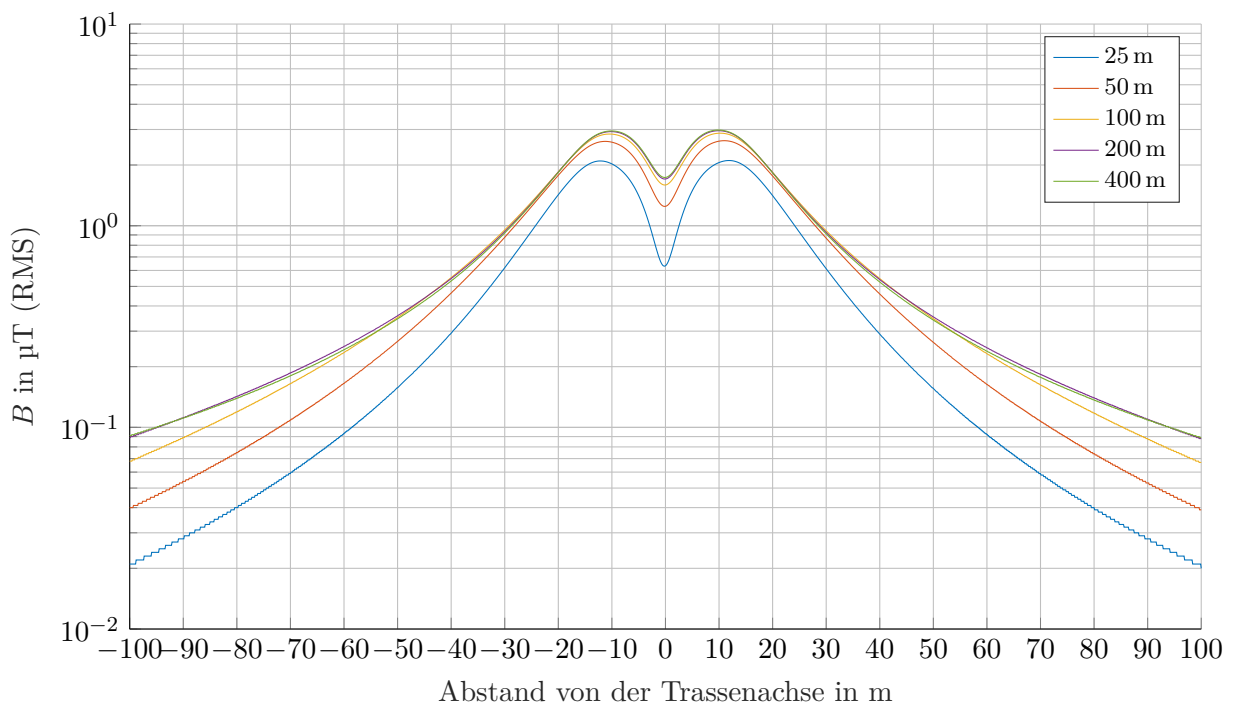


Abbildung 3.66: Magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Viersystem 102 mit zusätzlichen Erdseilen unter Veränderung der Spannfeldlänge

für kürzere Spannfeldlängen von 200, 100, 50 und 25 m dargestellt, was der Einfügung von Erdseil-Querverbindungen in den jeweiligen Abständen entspricht. Die Berechnung des Querschnitts erfolgte jeweils in der Mitte des Spannfelds. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Entfernung von der Trassenachse auch eine zunehmende Schirmwirkung der eingefügten Querverbindungen eintritt, und zwar umso stärker, je mehr Querverbindungen genutzt werden. Unmittelbar unterhalb der Leiterseile ist dieser Effekt allerdings nur gering ausgeprägt und genau auf Höhe der Trassenachse tritt sogar eine leichte Erhöhung der magnetischen Flussdichte ein. Beim Typ **Einebene-Viersystem 102** ist dagegen eine zusätzliche Schirmwirkung durch die Querverbindungen über den gesamten Einwirkungsbereich hinweg zu erkennen (siehe Abbildung 3.66).

3.1.3.6 Bewertung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass zusätzlich unterhalb der Leiterseile mitgeführte Erdseile eine Verringerung des elektrischen Feldes herbeiführen können. Die Stärke dieser Verringerung ist abhängig von der Mastgeometrie und tritt teilweise nur in unmittelbarer Nähe der Leitungstrasse auf. Die Erdseile schwächen auch die magnetische Flussdichte, wobei das Ausmaß dieser Abnahme von der Phasenordnung und von der Stromflussrichtung abhängig ist und oftmals durch Einfügung von Querverbindungen zwischen den Erdseilen gesteigert werden kann. Vergleicht man das Mastbild der Einebene-Zweissystem-Geometrie (Abbildung 3.4) mit dem der Einebene-Viersystem-Anordnung (Abbildung 3.8) oder das der Donau-Geometrie (Abbildung 3.3) mit dem der Einebene-Donau-Viersystem-Anordnung (Abbildung 3.7), so wird klar, dass für die Mitführung der zusätzlichen Erdseile deutlich höhere und aufwendigere Maste notwendig sind, was mehrere Nachteile mit sich bringt (siehe Abschnitt 3.1.2). Insgesamt erscheint die Verhältnismäßigkeit dieser Minimierungsmaßnahme fraglich.

Eine Ausnahme zu dieser Feststellung besteht bei der Führung von Hoch- und Höchstspannungsstromkreisen auf Gemeinschaftsmasten, wo durch die Verlegung der niedrigeren Spannungsebene auf der untersten Traverse ohne zusätzlichen Aufwand eine Abschirmung der höheren elektrischen Feldstärken der Höchstspannung erreicht werden kann. Dies stellt zugleich eine Abstandsoptimierung dar, da die Höchstspannungs-Stromkreise, die in aller Regel höhere Stromstärken führen als die der Hochspannung, nach oben verlagert werden. Nachdem dies bereits die übliche Bauform von Gemeinschaftsmasten darstellt und sich die vorliegende Arbeit auf das Verteilnetz beschränkt, soll hierauf nicht näher eingegangen werden.

3.1.4 Minimieren der Seilabstände

Die 26. BImSchVVwV schreibt dazu in ihrem Abschnitt 5.3.1.3:

„Die Abstände zwischen den Leiterseilen werden minimiert; hierzu gehört auch die Minimierung der Seilabstände innerhalb eines Stromkreises und zu anderen Stromkreisen.

Voraussetzungen: Die Maßnahme ist bei allen Leitungen möglich und kann bei Neubau realisiert werden. Immer wenn die Mastkopfbilder geändert werden sollen, ist die Maßnahme auch bei einer wesentlichen Änderung möglich. Mindestisolierluftstrecken zwischen den Seilen, zwischen Leiterseilen und dem Mast sowie anderen geerdeten Anlagenteilen oder zum Boden müssen eingehalten

Tabelle 3.10: Extremwerte der elektrischen Feldstärke zweisystemiger Mastgeometrien in verschiedenen Abständen von der Trassenachse in kV/m

	–100 m		–50 m		–20 m		–10 m		0 m	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Donau 62	0,00	0,01	0,02	0,04	0,15	0,24	0,89	1,02	0,69	1,92
Donau 74	0,00	0,01	0,02	0,04	0,21	0,30	1,16	1,31	0,94	2,04
Donau 106	0,01	0,01	0,03	0,06	0,41	0,50	1,38	1,54	0,74	1,68
Eineb.-Zweisys. 100	0,00	0,00	0,02	0,03	0,47	0,53	1,27	1,47	0,60	2,32
Tanne 45	0,00	0,01	0,01	0,05	0,04	0,07	0,81	0,83	0,59	1,93
Tonne 30	0,00	0,01	0,01	0,05	0,07	0,16	0,47	0,58	0,98	2,63

Tabelle 3.11: Extremwerte der magnetischen Flussdichte zweisystemiger Mastgeometrien in verschiedenen Abständen von der Trassenachse bei gleichsinnigem Stromfluss in μT

	–100 m		–50 m		–20 m		–10 m		0 m	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Donau 62	0,04	0,10	0,21	0,40	1,32	2,43	4,36	7,25	5,92	13,06
Donau 74	0,05	0,11	0,25	0,47	1,68	2,94	5,89	8,75	4,76	13,40
Donau 106	0,07	0,14	0,36	0,63	3,06	4,49	10,23	13,22	2,76	10,10
Eineb.-Zweisys. 100	0,05	0,13	0,20	0,53	2,31	3,64	11,00	11,91	2,42	14,72
Tanne 45	0,02	0,13	0,13	0,57	1,32	3,18	5,10	7,85	7,60	11,26
Tonne 30	0,02	0,13	0,10	0,57	0,99	3,17	3,75	8,03	10,00	13,12

werden. Durch besondere Ausführung der Masten und Spannfelder bei geringem Durchhang kann eine deutliche Verringerung des Abstandes zwischen Leiterseilen und Stromkreisen erreicht werden. Wirksamkeit: Die Wirksamkeit ist hoch. Sie wird allerdings von anderen Anlagenparametern beeinflusst und ist abhängig vom Abstand zu den Leitern.

Hinweise: Kurze Luftstrecken können in Abhängigkeit von der Spannungsebene Geräuschemission durch Koronaeffekte fördern und besondere Maßnahmen bei der Wartung, zum Beispiel zur Besteigbarkeit, erfordern, wenn mehr als ein System an einem Mast geführt wird. Die Maßnahme wird beeinflusst durch die Ausschwingweite und die Mindestisolierluftstrecke der Leiterseile. Bei einer neu zu bauenden Leitung verursachen minimierte Seilabstände nur geringen zusätzlichen Aufwand“.

Die Wirksamkeit dieser Minimierungsmaßnahme soll anhand der drei im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Donau-Geometrien Donau 62, Donau 74 und Donau 106 geprüft werden. In Tabelle 3.10 sind die Extremwerte der elektrischen Feldstärke aller betrachteten zweisystemigen Anordnungen in 1 m Höhe über dem Erdboden bei 7 m Höhe der untersten Leiterseile über alle sechs Phasenanordnungen mit unterschiedlichen Feldstärkeverläufen für ausgewählte Abstände von der Trassenachse aufgelistet. Die entsprechenden Werte für die magnetische Flussdichte bei 500 A gleichsinnigem Stromfluss finden sich in Tabelle 3.11 und für entsprechenden gegensinnigen Stromfluss in Tabelle 3.12. Aufgrund der in sehr guter Näherung zutreffenden Symmetrie der Feldstärke- und Flussdichteverläufe zur Trassenachse wird nur die linke Seite betrachtet.

Tabelle 3.12: Extremwerte der magnetischen Flussdichte zweisystemiger Mastgeometrien in verschiedenen Abständen von der Trassenachse bei gegensinnigem Stromfluss in μT

	−100 m		−50 m		−20 m		−10 m		0 m	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Donau 62	0,02	0,09	0,08	0,35	1,01	2,27	5,08	7,71	1,24	11,71
Donau 74	0,02	0,10	0,11	0,42	1,42	2,80	6,87	9,44	2,65	12,80
Donau 106	0,03	0,13	0,21	0,56	3,04	4,47	9,62	12,75	6,16	11,51
Eineb.-Zweisy. 100	0,05	0,13	0,20	0,52	2,30	3,63	10,91	11,84	2,42	14,74
Tanne 45	0,02	0,13	0,13	0,57	1,30	3,16	5,13	7,85	8,51	11,90
Tonne 30	0,03	0,14	0,15	0,59	1,07	3,20	3,58	7,96	9,16	12,49

3.1.4.1 Ergebnisse

Es fällt auf, dass in allen betrachteten Abständen mit Ausnahme von 0 m der Typ Donau 106 größere Feldstärke- und Flussdichtewerte hervorruft als der Typ 74, der wiederum stets vom Typ Donau 62 unterboten wird. Angesichts der jeweils geringeren Abstände der Leiterseile zueinander bei den genannten Typen ist die daraus resultierende bessere gegenseitige Feldauslöschung wenig verwunderlich (vergleiche Abschnitt 2.4). Lediglich unmittelbar auf der Trassenachse herrschen keine einheitlichen Verhältnisse, was sich aus den in Abschnitt 3.1.1 dargestellten Diagrammen erklärt. Im Lichte dieser Daten fällt es leicht, den Schluss zu ziehen, dass der Typ Donau 62 dem Typ Donau 74 und dieser wiederum dem Typ Donau 106, beziehungsweise ganz allgemein ein Masttyp mit geringeren Leiterseilabständen einem solchen mit größeren Leiterseilabständen unter dem Gesichtspunkt der Feldminimierung vorzuziehen sei.

3.1.4.2 Aspekte der Leiterseilisolation, des Arbeits- und des Naturschutzes

Es ist dabei aber zu bedenken, dass Freileitungsmaste in aller Regel eine unter netzbetrieblichen Gesichtspunkten optimierte Konstruktion darstellen. Die Abstände der Leiterseile zueinander sind so gewählt, dass eine sichere Isolation der unter Spannung stehenden Leiterseile unter allen Umständen, also auch beim Ausschwingen durch Windeinfluss oder unter der Belastung durch Eisbelag, gewährleistet ist. Wollte man aus Gründen der Feldminimierung die Abstände der Leiterseile zueinander verringern, so müsste man die sichere Isolation der Leiterseile zueinander entweder durch kürzere Spannungsfeldlängen oder durch eine erhöhte Seilspannung gewährleisten. Die erstere Lösung würde eine größere Zahl an Masten erfordern und die letztere kräftigere Masten mit gegebenenfalls stärkerem Fundament ([25] Abschnitt 4.1.2.1). Eine erhöhte Seilzugspannung erfordert zudem Leiterseile mit einer gesteigerten Zugfestigkeit, also solche mit einem größeren Stahlanteil. Dieser wiederum erhöht bei gleichem Gesamtquerschnitt den elektrischen Widerstand und reduziert damit die mögliche Übertragungsleistung der Leitung.

Ferner sind Gesichtspunkte des Arbeitsschutzes zu beachten: Aus Gründen der Versorgungssicherheit ist es bei mehrsystemigen Masten erforderlich, dass der Mast auch dann bestiegen werden kann, wenn die von ihm getragenen Systeme nicht oder nur teilweise abgeschaltet sind. Die einschlägige Unfallverhütungsvorschrift DGUV 3 verlangt in ihrem § 7, dass bei Arbeiten in der Nähe aktiver

Teile elektrischer Anlagen und Betriebsmittel, die nicht gegen direktes Berühren geschützt sind, die zulässigen Annäherungen nicht unterschritten werden dürfen [26]. Die dazugehörigen Durchführungsanweisungen legen für *„Arbeiten an einem Stromkreis von Freileitungen, wenn mehrere Stromkreise (Systeme) mit Nennspannungen über 1 kV auf einem gemeinsamen Gestänge liegen“* fest, dass dieser Schutzabstand bei einer Nennspannung von 110 kV 2,0 m beträgt [27]. Dies setzt der Verringerung des Abstandes der Systeme zueinander Grenzen, wie auch beim von Bauhofer vorgeschlagenen Sondermastbild zu beobachten (siehe Abschnitt 3.1.1.7).

„Baugruben im Bereich der Maststandorte können insbesondere für Amphibien aber auch für andere bodengebundene Arten aufgrund der häufigen Füllung mit Wasser eine Falle darstellen, so dass es hierdurch zu Individuenverlusten kommen kann und das Tötungsverbot des § 44 Abs. 1 Nr. 1 BNatSchG einschlägig ist“ ([22] Abschnitt 3.4). Eine größere Zahl an Masten ist folglich auch unter Naturschutzgesichtspunkten kritisch zu sehen.

Wie die 26. BImSchVVwV zutreffend feststellt, kann eine dichtere Anordnung der unter verschiedenen Spannungen stehenden Leiterseile zueinander größere Randfeldstärken an den Leiterseilen mit sich bringen, die dazu geeignet sind, vermehrt Korona-Entladungen und damit auch stärkere Korona-Geräusche hervorzurufen. Da allerdings in der 110-kV-Spannungsebene die Korona-Geräusche so leise sind, dass sie in aller Regel deutlich von den Umgebungsgeräuschen überdeckt werden, dürften die Praxisauswirkungen dieses Zusammenhangs vernachlässigbar sein.

3.1.5 Optimieren der Mastkopfgeometrie

Die 26. BImSchVVwV schreibt zur Optimierung der Mastkopfgeometrie in ihrem Abschnitt 5.3.1.4:

„Zwischen möglichen Masttypen, wie zum Beispiel Tonnenmast und Donaumast, wird derjenige ausgewählt, dessen Mastkopfbild eine für die Kompensation von entstehenden elektrischen und magnetischen Feldern geometrisch günstige Aufhängung der Leiterseile ermöglicht. Die wesentlichen Unterschiede der verschiedenen Masttypen bestehen in den geometrischen Anordnungsmöglichkeiten der Leiterseile, die horizontal, vertikal oder dreieckförmig sein können. Dabei ist für die Kompensation von elektrischen und magnetischen Feldern grundsätzlich eine vertikale Anordnung der Außenleiterseile günstiger als eine horizontale.“

Voraussetzungen: Bei Neubau können der Masttyp und damit die Mastkopfgeometrie festgelegt werden. Bei Neubau und insbesondere wesentlicher Änderung können technische Randbedingungen wie die Mitführung mehrerer Systeme die Wahlmöglichkeiten einschränken.

Wirksamkeit: Die Wirksamkeit ist hoch.

Hinweise: Der zusätzliche Aufwand für einen Masttyp mit günstiger Mastgeometrie kann schon bei Neubau zum Beispiel aufgrund unterschiedlicher Masthöhen erheblich sein. Bei wesentlicher Änderung kann die Wahl eines günstigeren Masttyps oft an technische Grenzen stoßen“.

Beim Blick in Tabelle 3.10 fällt auf, dass die Tannen- und die Tonnengeometrie bei 10 und 20 m Abstand von der Trassenachse deutlich geringere elektrische Feldstärken hervorrufen als die übrigen Geometrien. Dagegen sind im Hinblick auf die magnetische Flussdichte (Tabellen 3.11 und 3.12) Donau 62 und Donau 74 der Tannen- und der Tonnenanordnung meist ebenbürtig. Der Typ Einebene-Zweissystem 100 fällt dadurch auf, dass er meist hinter dem Typ Donau 106 die zweithöchsten und manchmal sogar die höchsten Feldstärke- und Flussdichtewerte hervorruft. Die Feststellung

der 26. BImSchVVwV, dass eine vertikale Anordnung der Leiterseile besser sei als eine horizontale, wird bestätigt.

3.1.5.1 Vor- und Nachteile der einzelnen Mastkopfgeometrien

Es ist jedoch zu beachten, dass die Mastkopfgeometrie einer Freileitung oftmals nicht frei gewählt werden kann. Ist eine besonders niedrige Masthöhe erforderlich, beispielsweise in der Nähe von Flugplätzen, so kommt nur eine Einebenen-Anordnung in Frage. Soll dagegen die Trassenbreite möglichst schmal gehalten werden, so ist die Tonnen-Geometrie das Mittel der Wahl. Dies kommt beispielsweise bei Waldschneisen zum Tragen, um den Holzeinschlag möglichst gering zu halten. Weiterhin unterscheiden sich die verschiedenen Masttypen hinsichtlich ihrer baulichen Anforderungen: Bei einer Einebenen-Anordnung bestehen beispielsweise gegenüber anderen Masttypen erhöhte statische Anforderungen an die (breitere) Traverse, was mit höheren Kosten verbunden ist. Tannen- und Tonnenmast bringen aufgrund ihrer größeren Bauhöhe und der mit der Höhe zunehmenden Windgeschwindigkeiten stärkere Belastungen für die Fundamente mit sich, die dementsprechend massiver und teurer ausgeführt werden müssen. Sofern auf der gewählten Trasse keine zwingenden Gründe für die Wahl einer bestimmten Mastgeometrie bestehen, stellt die Donau-Geometrie einen guten Kompromiss im Hinblick auf Trassenbreite, Masthöhe und Baukosten dar und ist daher nicht ohne Grund in weiten Teilen Deutschlands die vorherrschende zweisystemige 110-kV-Mastbauform. Dieser Kompromiss erscheint im Hinblick darauf, dass der Donaumast den Tannen- und Tonnengeometrien im Hinblick auf die Minimierung der magnetische Flussdichte kaum nachsteht und dass die 26. BImSchVVwV im Niederfrequenzbereich die bevorzugte Minimierung der magnetischen Flussdichte vorschreibt, auch unter den Gesichtspunkten der Feldminimierung vertretbar.

Zur Minderung des Kollisionsrisikos von Vögeln mit Freileitungen ist die Reduzierung der Kollisionsebenen anzustreben, also die Leiterseile möglichst in einer Ebene anzuordnen ([28] Abschnitt 4.5). Dies bedeutet, dass unter dem Gesichtspunkt des Vogelschutzes bei den zweisystemigen Mastgeometrien die Einebene-Geometrie der Donau-Geometrie und diese wiederum der Tannen- oder Tonnen-Geometrie vorzuziehen ist. Im Falle der einsystemigen Masten ist entsprechend der Einebene-Einsystem-Geometrie der Vorzug zu geben und im Falle der viersystemigen Masten der Einebene-Viersystem-Geometrie. Die Einebene-Geometrie ist, wie oben dargestellt, sowohl unter dem Gesichtspunkt der Feldminimierung als auch unter dem der Baukosten ungünstig. Dies spricht einmal mehr für die Donau-Geometrie als unter dem Gesichtspunkt des Vogelschutzes immerhin zweitbeste Wahl.

3.1.6 Schlussfolgerungen

Im Rahmen der vorstehenden Abschnitte wurden folgende Erkenntnisse über die von der 26. BImSchVVwV für Freileitungen vorgesehenen Minimierungsmaßnahmen gewonnen:

- Die Feldminimierung durch Optimieren der Leiteranordnung ist grundsätzlich wirksam, kann aber nur bei frei wählbarer Phasenreihenfolge durchgeführt werden. Da aber die bei gleichsinigem Stromfluss optimale Phasenlage bei gegensinnigem Stromfluss oftmals die ungünstigste ist, kann diese Minimierungsmethode in Zeiten der Energiewende mit zunehmender dezentra-

ler Energieeinspeisung nicht genutzt werden. Eine Ausnahme besteht lediglich bei der selten vorkommenden Parallelschaltung von Stromkreisen und bei Großverbrauchern bzw. Großeinspeisern.

- Die Feldminimierung durch Abstandsoptimierung (Höherlegung der Leiterseile) bringt in vielen Fällen eine Verringerung der magnetischen Flussdichte und der elektrischen Feldstärke mit sich, steht allerdings entweder dem Vogel- und dem Landschaftsschutz entgegen oder führt zu einer Beeinträchtigung von Grundstückseigentümern durch zusätzliche Maststandorte. In jedem Fall entstehen höhere Kosten.
- Die elektrische Schirmung kann eine Verringerung der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte mit sich bringen, erfordert aber deutlich aufwendigere und höhere Mastkonstruktionen (Nachteile siehe oben) sowie stärkere Fundamente.
- Das Minimieren der Seilabstände ist sowohl im Hinblick auf die elektrische Feldstärke als auch auf die magnetische Flussdichte wirksam, erfordert aber entweder eine größere Zahl an oder kräftigere Masten. Neben den erhöhten Kosten sind im ersteren Fall nachteilige Auswirkungen auf die Tierwelt und im letzteren Fall eine verringerte Übertragungsleistung oder eine Vergrößerung des Leiterseilquerschnitts mit entsprechenden statischen Konsequenzen die Folge.
- Die Optimierung der Mastkopfgeometrie kann geringere elektrische Feldstärken und magnetische Flussdichten mit sich bringen, allerdings ist die Mastkopfgeometrie in einigen Fällen durch die Umgebung der Leitung festgelegt. Werden die feldoptimalen Tannen- oder Tonnengeometrien gewählt, sind höhere Kosten und nachteilige Auswirkungen auf den Vogelschutz zu erwarten.

Insgesamt ist festzustellen, dass keine der wirksamen Minimierungsmaßnahmen ohne höhere Kosten, verringerte Übertragungsleistung oder nachteilige Auswirkungen auf die Umwelt ausgeführt werden kann. Einzige Ausnahme sind (dauerhaft) parallel geschaltete Stromkreise auf gemeinsamem Gestänge, bei denen die Leiteranordnung, sofern sie nicht durch andere Begleitumstände der Leitung vorgegeben ist, ohne zusätzlichen Aufwand optimiert werden kann.

3.2 Erdkabel

Im Bereich der Mittelspannung werden neue oder als Ersatz neu gebaute Leitungen fast ausschließlich als Erdkabel realisiert. In der Hochspannungsebene kommen dagegen Erdkabel nur dann zum Einsatz, wenn beispielsweise aufgrund dichter Bebauung oder wegen gesetzlicher Vorschriften keine Freileitung errichtet werden kann. So schreibt das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) in seinem § 43h vor: *„Hochspannungsleitungen auf neuen Trassen mit einer Nennspannung von 110 Kilovolt oder weniger sind als Erdkabel auszuführen, soweit die Gesamtkosten für Errichtung und Betrieb des Erdkabels die Gesamtkosten der technisch vergleichbaren Freileitung den Faktor 2,75 nicht überschreiten [...]“*. Erdkabel bieten in der Hochspannungsebene keinen Vorteil hinsichtlich der Versorgungssicherheit, haben aber einen weitaus höheren Blindleistungsbedarf als eine Freileitung und sind im Falle einer Störung schwieriger instand zu setzen. In beiden Spannungsebenen kamen in der Vergangenheit verschiedene Bauarten von Kabeln zum Einsatz, doch in der heutigen Zeit stellen sowohl in der Mittel- als auch in der Hochspannung mit vernetztem Polyethylen (VPE) isolierte Kabel den Stand der Technik und damit das Mittel der Wahl für Neubauten dar.

Im Rahmen dieses Abschnittes soll geprüft werden, inwieweit sich die von der 26. BImSchVVvV vorgesehen Minimierungsmaßnahmen auf die von Erdkabeln ausgehende magnetische Flussdichte auswirken. Eine Betrachtung der elektrischen Feldstärke ist nicht notwendig, da diese bereits durch den Kabelschirm abgeschirmt wird und somit nicht nach außen treten kann. Da Erdreich nur über eine verhältnismäßig geringe elektrische Leitfähigkeit verfügt und in Oberflächennähe natürlicherweise keine ferromagnetischen Bestandteile enthält, ist es unerheblich, ob der Raum zwischen dem betrachteten Punkt und dem Kabel mit Erdreich, Luft oder mit einer beliebigen Mischung derselben gefüllt ist. Zwar besteht innerhalb der Kabel der Kabelschirm aus leitfähigem Metall, doch kann dessen Schirmwirkung durch Induktion und Gegeninduktion (siehe Abschnitt 2.3.2) aufgrund seiner geringen Dicke vernachlässigt werden. Auf dickere Abschirmungen in Form von Metallrohren wird in Abschnitt 4.1 genauer eingegangen.

Für den Innenleiter von Mittel- und Hochspannungskabeln werden aus fertigungstechnischen Gründen üblicherweise mehrdrähtige Leiter verwendet, deren Durchmesser bei gleichem Leiterquerschnitt größer ist als bei Massivleitern. Im Rahmen dieser Arbeit wird dieser Unterschied vernachlässigt und für den Innenleiter derjenige Durchmesser angenommen, der sich rechnerisch für einen Massivleiter, also für einen ausgefüllten Kreis desselben Querschnitts, ergibt. Für die sich ergebende magnetische Feldverteilung ist dies praktisch bedeutungslos, zumal keiner der übrigen Werkstoffe des Kabels eine nennenswert von eins verschiedene relative magnetische Permeabilität aufweist.

Sowohl in der Mittel- als auch in der Hochspannung werden Kabel entweder als Dreieck- oder als Einebene-Anordnung verlegt. Die Einebene-Anordnung mit Abständen zwischen den Phasenleitern hat dabei den Vorteil, dass sie eine bessere Wärmeabfuhr ermöglicht ([29] S. 116). Vor dem Hintergrund, dass die Belastungsgrenze eines Kabels durch dessen höchstzulässige Temperatur bestimmt wird, bedeutet die Einebene-Anordnung somit eine höhere mögliche Übertragungsleistung. Insbesondere in der Hochspannungsebene kann es zur Unterbringung der Verbindungsmuffen zwischen einzelnen Kabelstücken geboten sein, bei einer ansonsten in Dreiecksanordnung verlegten Kabelstrecke stellenweise auf Einebenenordnung zu wechseln. Ferner ist in der Hochspannungsebene das Verlegen der einzelnen Phasenleiter in Leerrohren aus Kunststoff üblich. Dies hat den Vorteil,

dass die Tiefbauarbeiten zeitlich unabhängig vom Einziehen und Verbinden der Kabelabschnitte sind, wodurch die Tiefbauarbeiten zeitlich kürzer und damit umweltschonender und kostengünstiger gehalten werden können. Im Falle eines auftretenden Kabelfehlers kann das schadhafte Kabelstück zudem zwischen den jeweils benachbarten Muffen aus dem Leerrohr heraus- und ein Ersatzkabel hineingezogen werden, was die Fehlerbehebung günstiger und schneller macht.

Im Rahmen dieser Arbeit wird bei Kabeln stets der Achsabstand der Phasenleiter angegeben (Abbildung 3.67). Im Falle zwei- oder mehrsystemiger Anordnungen bezieht sich der Achsabstand zwischen den Systemen auf den Mittelpunkt der jeweiligen Systeme (Abbildung 3.68). Bei Verlegung im dichten Dreieck, also ohne Verwendung von Leerrohren, entspricht Maß a dem Außendurchmesser der Kabel; bei Verwendung von Leerrohren entspricht Maß a dem Außendurchmesser der Rohre. Die angegebene Verlegetiefe der Kabel bezieht sich immer auf das in den Abbildungen dargestellte Bezugsniveau. Die Phasenbelegung wird in allen Fällen von links nach rechts angegeben, beispielsweise 123 / 123. Dasselbe gilt für die Lastflussrichtung, beispielsweise --- / +++.

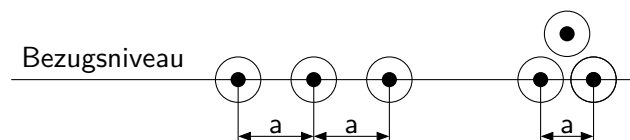


Abbildung 3.67: Bemaßung bei einsystemiger Anordnung – links Einebene, rechts Dreieck

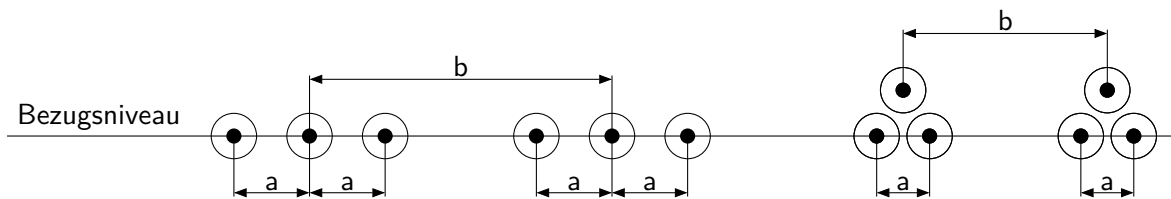


Abbildung 3.68: Bemaßung bei zweisystemiger Anordnung – links Einebene, rechts Dreieck

Folgende Kabeltypen sollen für die Prüfung der Wirksamkeit der Minimierungsmaßnahmen betrachtet werden:

- In der **Mittelspannung** zum einen ein Kabelsystem mit $3 \times 240 \text{ mm}^2$ Querschnitt und 47 mm Dreieck-Phasenleiter-Achsabstand und zum anderen ein Kabelsystem mit $3 \times 630 \text{ mm}^2$ Querschnitt und 55 mm Dreieck-Phasenleiter-Achsabstand. Beide Systeme stellen typische Vertreter von Mittelspannungskabeln dar; ihre Maße sind dem Standardanlagenkatalog des Verbands der Bayerischen Energie- und Wasserwirtschaft (VBEW) entnommen [30]. In aller Regel besteht der Innenleiter dieser Kabel aus Aluminium, was jedoch für die Feldverteilung keine Rolle spielt. Diese beiden Kabelsysteme sind nicht gegeneinander austauschbar, sondern repräsentieren unterschiedliche Klassen der Übertragungsleistung. Beide Kabeltypen sollen sowohl mit einem als auch mit zwei Systemen und sowohl in Dreieck- als auch in Einebene-Anordnung betrachtet werden. Bei einer zweisystemigen Dreieck-Anordnung wird ein System-Achsabstand von 25 cm verwendet [30]; im Falle der Einebene-Anordnung beträgt der Phasenleiter-Achsabstand 15 cm [30] und der System-Achsabstand damit 45 cm. Zusätzlich soll eine dreisystemige Mittelspannungs-Kabelanlage mit $3 \times 3 \times 630 \text{ mm}^2$ Querschnitt in Dreieck-Anordnung untersucht werden, wie sie in städtischen Gegenden oder in Umspann-

werksnähe durchaus vorkommen kann. Auch hier wird ein System-Achsabstand von 25 cm angenommen. In Anlehnung an den Standardanlagenkatalog des VBEW wird eine Verlegetiefe von 60 cm gewählt.

- Auch in der **Hochspannung** existieren unterschiedliche Kabelquerschnitte, die je nach vorgesehener Übertragungsleistung zum Einsatz kommen. Stellvertretend soll im Rahmen dieses Abschnitts zum einen der Typ $3 \times 1000 \text{ mm}^2$ untersucht werden. Dieser soll sowohl ein- als auch zweisystemig vorkommen. Er liegt entweder im dichten Dreieck (96 mm Phasenleiter-Achsabstand) oder im Dreieck in Kunststoff-Leerrohren mit 160 mm Durchmesser. Im Falle des dichten Dreiecks soll der System-Achsabstand 0,5 m und im Falle der Verlegung in Kunststoffrohren 1,0 m betragen. Zum anderen soll der Typ $3 \times 2500 \text{ mm}^2$ in Einebene-Anordnung mit 400 mm Phasenleiter-Achsabstand und, im Falle von zwei Systemen, 1,5 m System-Achsabstand betrachtet werden. Die Verlegetiefe soll 1,5 m betragen, was einen typischen Wert darstellt (siehe unten). Diese Maße wurden freundlicherweise bereitgestellt von der Bayernwerk Netz GmbH, Regensburg.

Mittel- und Hochspannungskabel werden innerhalb geschlossener Ortschaften in aller Regel am Straßenrand unterhalb des Gehwegs verlegt. Dies folgt aus den Vorgaben der „Allgemeine Technische Bestimmungen für die Benutzung von Straßen durch Leitungen und Telekommunikationslinien“ ([31] Abschnitt 2). In der Norm DIN 1998 finden sich genauere Vorgaben, wie die Breite des Gehwegs in Zonen für die einzelnen Ver- und Entsorgungsleitungen aufzuteilen ist. Diese Festlegung ist auch als Spartenkonvention bekannt. Weiterhin ist festgelegt, dass innerhalb einer Sparte in der oberen Lage vorrangig Leitungen zur Versorgung der anliegenden Grundstücke anzuordnen sind, während Leitungen zur regionalen oder überregionalen Versorgung in den tieferen Lagen geführt werden sollen [32]. Entsprechend dieser Anordnung nach Spannungsebenen befinden sich Mittelspannungskabel üblicherweise in 60 bis 80 cm Tiefe, während Hochspannungskabel in 1,2 m Tiefe geführt werden. Außerorts befinden sich Mittelspannungskabel zumeist am Straßenrand in ähnlicher Tiefe wie innerorts, während Hochspannungskabel in der Regel querfeldein verlegt werden. Dies folgt aus den unterschiedlichen Strukturen und Versorgungsaufgaben der Spannungsebenen. Bei der Verlegung querfeldein muss, um das Kabel vor Beschädigungen durch landwirtschaftliches Gerät zu schützen und um im Interesse der landwirtschaftlichen Nutzung die Erwärmung der oberen Bodenschichten in Grenzen zu halten⁷, eine größere Verlegetiefe gewählt werden. Üblich sind in solchen Fällen 1,5 m.

Im Interesse einer besseren Vergleichbarkeit der Anordnungen soll der Strom in allen betrachteten Fällen 500 A betragen, auch wenn dies im Falle der kleineren Mittelspannungskabel eine übermäßige und im Übrigen eine nur teilweise Auslastung bedeutet. Zur Unterscheidung der Kabeltypen werden Leiterquerschnitt, Leiteranordnung, Leiter-Achsabstand, Anzahl der Systeme und System-Achsabstand mit der in Tabelle 3.13 dargestellten Nomenklatur in einer einzigen Bezeichnung vereinigt. Es werden folglich

- in der Mittelspannung die Typen 240D47-1, 240D47-2-250, 240E150-1, 240E150-2-450, 630D55-1, 630D55-2-250, 630D55-3-250, 630E150-1 und 630E150-2-450 und

⁷In [33] Abschnitt 5.4.8.5 analog für die Höchstspannungsebene.

- in der Hochspannung die Typen 1000D96-1, 1000D160-1, 1000D96-2-500, 1000D160-2-1000, 2500E400-1 und 2500E400-2-1500 betrachtet.

Tabelle 3.13: Übersicht über die Nomenklatur der Erdkabel

	Leiterquersch.	Leiteranordnung	Leiter-Achsabstand	Anzahl d. Systeme	System-Achsabstand*
Mögl.	240	Dreieck (D)	47	1	250
Werte	630	Einebene (E)	55	2	450
	1000		96	3	500
	2500		150		1000
			160		1500
			400		
Einheit	mm ²		mm		mm

*wird nur angegeben bei mehr als einem System.

Gemäß 26. BImSchVVwV beträgt der Einwirkungsbereich für 110-kV-Kabel 35 m und für Mittelspannungskabel 10 m vom äußeren Kabel. Diese Bereiche sollen auch im Rahmen der folgenden Abschnitte betrachtet werden, wobei im Interesse einer übersichtlicheren Darstellung von der Trassenachse aus gemessen wird. Abschnitt 4 der 26. BImSchVVwV folgend wird, genau wie bei den Freileitungen, der Querschnitt zur Trassenachse in 1 m Höhe über dem Erdboden berechnet.

3.2.1 Optimieren der Leiteranordnung

Die 26. BImSchVVwV schreibt dazu in ihrem Abschnitt 5.3.2.2:

„Bei einer vorgegebenen geometrischen Anordnung der einzelnen Kabel wird die Anschlussreihenfolge der Drehstromleiter an die Erdkabel so gewählt, dass sich die von den Kabeln ausgehenden magnetischen Felder bestmöglich kompensieren.

Voraussetzungen: Die Maßnahme kann durchgeführt werden, wenn mehr als ein Stromkreis in einer Trasse verlegt ist und die geometrische Anordnung der einzelnen Kabel gleich bleibt, wie bei der Verlegung von Einleiterkabeln. Bei Neubau kann die Maßnahme durchgeführt werden; bei wesentlicher Änderung ist sie möglich, wenn ein längerer Leitungsabschnitt oder die gesamte Leitung betroffen ist.

Wirksamkeit: Die Wirksamkeit ist hoch und wird von anderen Anlagenparametern, wie der geometrischen Anordnung der einzelnen Kabel oder dem Leiterabstand beeinflusst. Geringe Leiterabstände erhöhen die Wirksamkeit dieser Maßnahme.

Hinweise: Bei einer Leistungsflussumkehr in einem Stromkreis kann sich die Anlage in einem nicht optimierten Zustand hinsichtlich des Magnetfeldes befinden. Der zusätzliche Aufwand bei einer neu zu bauenden Leitung ist gering. In kurzen Leitungsabschnitten ist eine Änderung der Leiteranordnung meist mit einem enormen Aufwand verbunden“.

Die Grundlagen zum Wirkprinzip dieser Minimierungsmethode sind in Abschnitt 3.1.1 dargestellt. Dort findet sich auch die Erläuterung, wieso im Mittel- und im Hochspannungsnetz im Allgemeinen keine vorherrschende Lastflussrichtung mehr angenommen werden kann. Wie bereits bei den Freileitungen praktiziert sollen deswegen auch bei den (zweissystemigen) Kabeln sowohl der Fall des

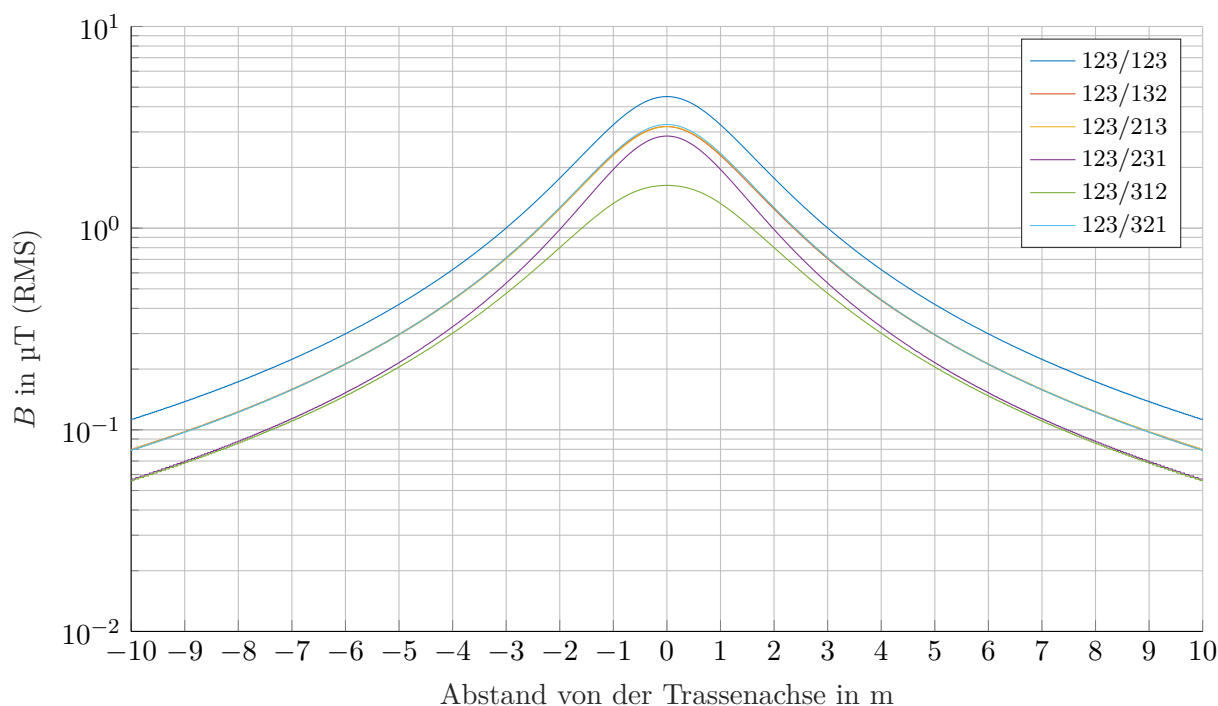


Abbildung 3.69: Magnetische Flussdichte beim Typ 240D47-2-250 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

gleichsinnig positiven Stromflusses als auch der Fall einer gegensinnigen Lastflussrichtung der Art --- / +++ betrachtet werden.

3.2.1.1 Ergebnisse für die zweisystemigen Anordnungen

Bei den **Mittelspannungskabeln** zeigt sich, dass bei gleichsinnigem Stromfluss im Falle der Dreieck-Verlegung die Phasenordnung 123 / 312 über den gesamten Querschnitt die geringste magnetische Flussdichte hervorruft (Abbildungen 3.69 und 3.73). Kehrt sich die Lastflussrichtung dagegen um, so ist die vorher ungünstigste Phasenordnung 123 / 123 optimal, und dies sogar mit deutlichem Abstand gegenüber den übrigen Anordnungen (Abbildungen 3.70 und 3.74). Bei den Einebene-Verlegungen ist im Falle des gleichsinnigen Stromflusses die Phasenordnung 123 / 321 (Abbildungen 3.71 und 3.75) und im Falle des gegensinnigen Stromflusses die Phasenordnung 123 / 123 (Abbildungen 3.72 und 3.76) mit deutlichem Abstand optimal. Auch hier stellt die Phasenordnung, die bei der einen Flussrichtung die geringsten Flussdichtewerte hervorruft, im Falle der anderen Flussrichtung die ungünstigste Phasenordnung dar. Diese Erkenntnisse lassen sich auf die **Hochspannungskabel** übertragen (Abbildungen 3.77 bis 3.82).

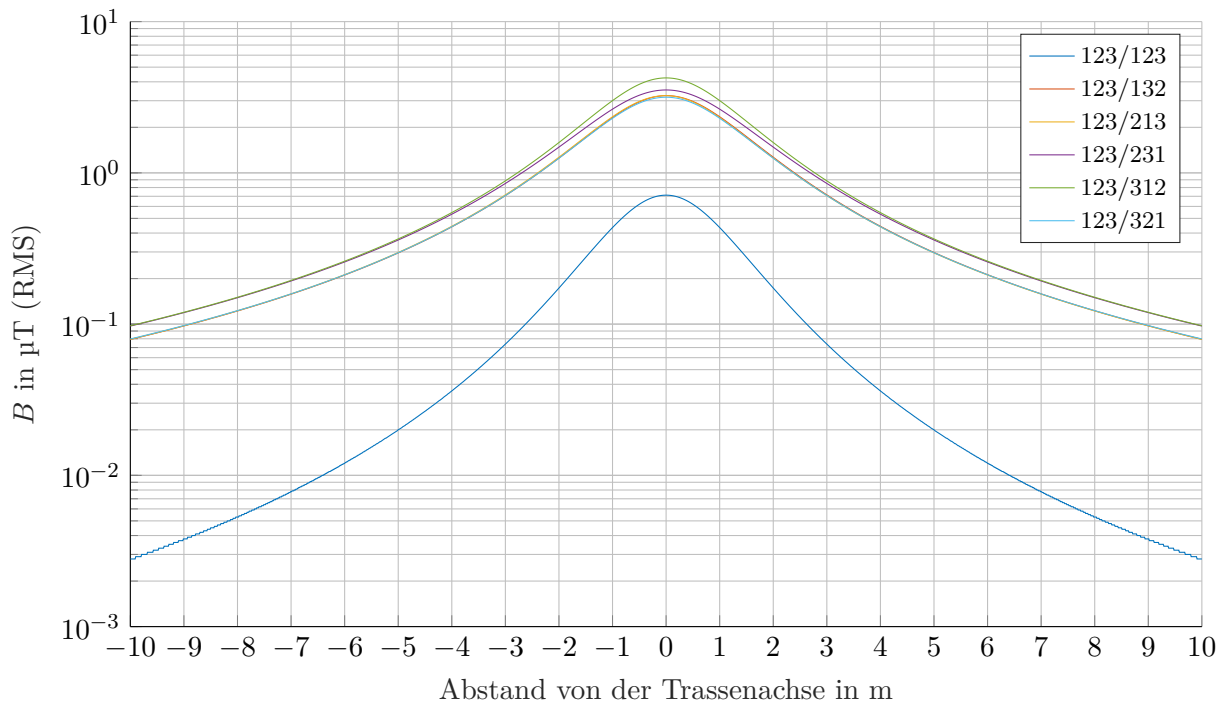


Abbildung 3.70: Magnetische Flussdichte beim Typ 240D47-2-250 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

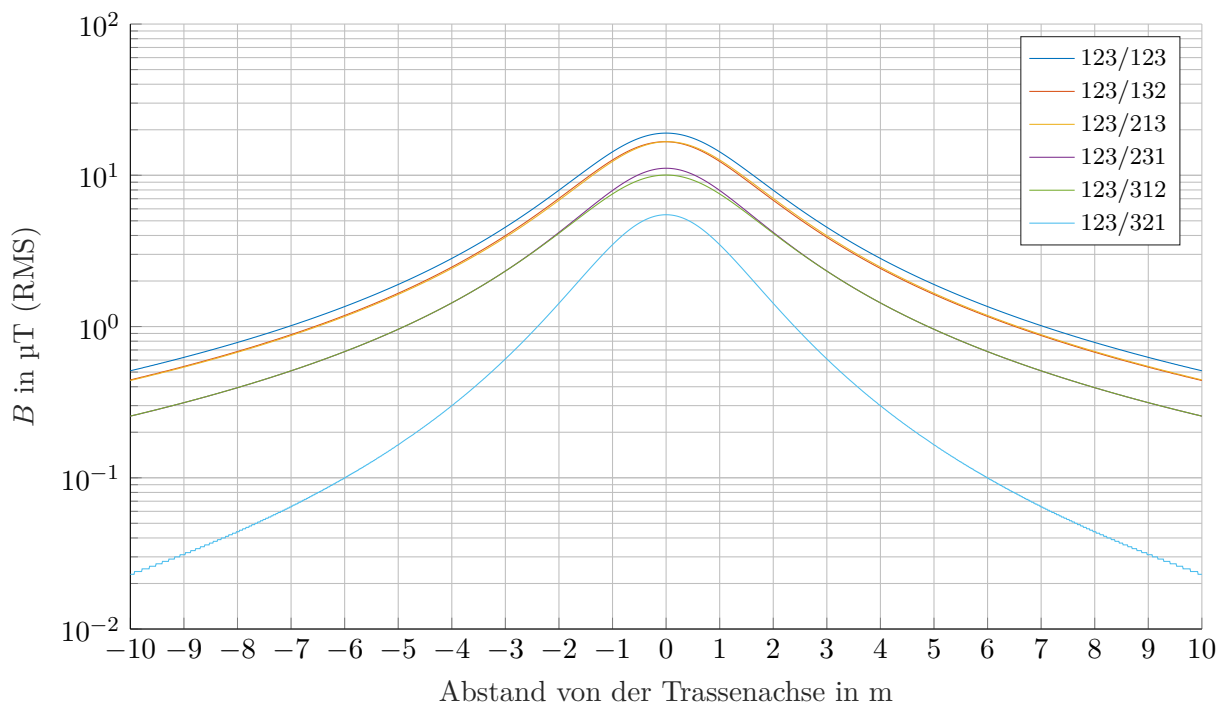


Abbildung 3.71: Magnetische Flussdichte beim Typ 240E150-2-450 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

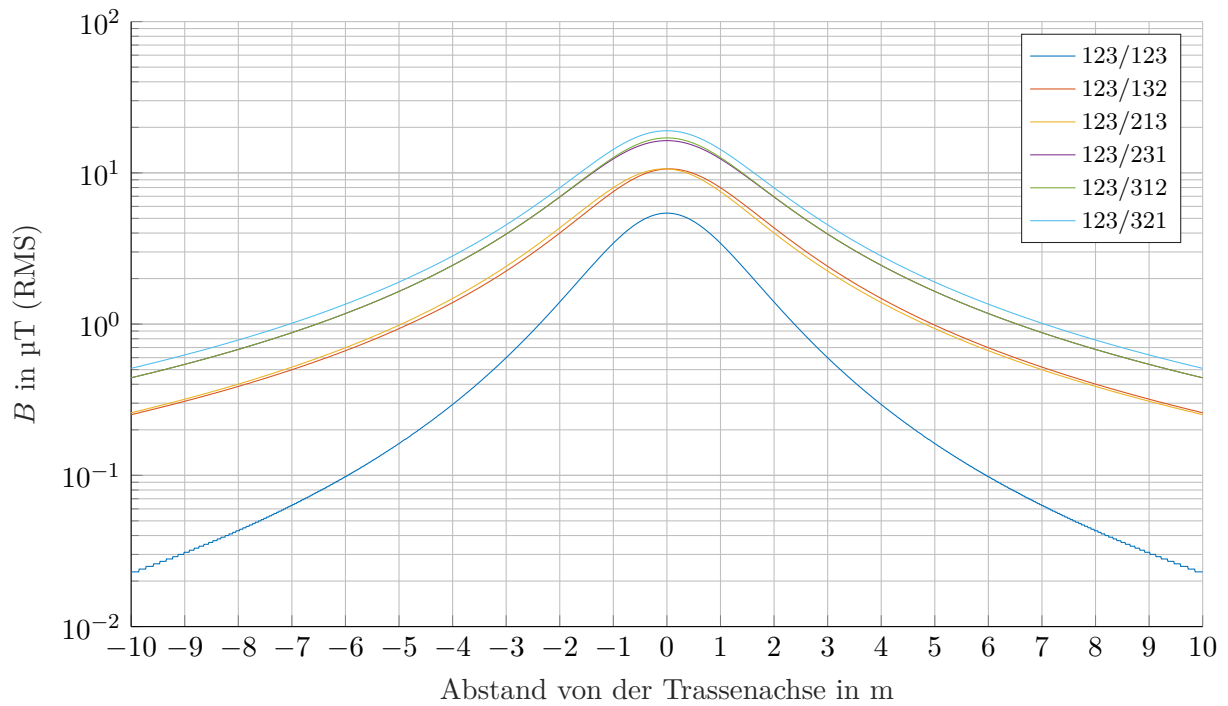


Abbildung 3.72: Magnetische Flussdichte beim Typ 240E150-2-450 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

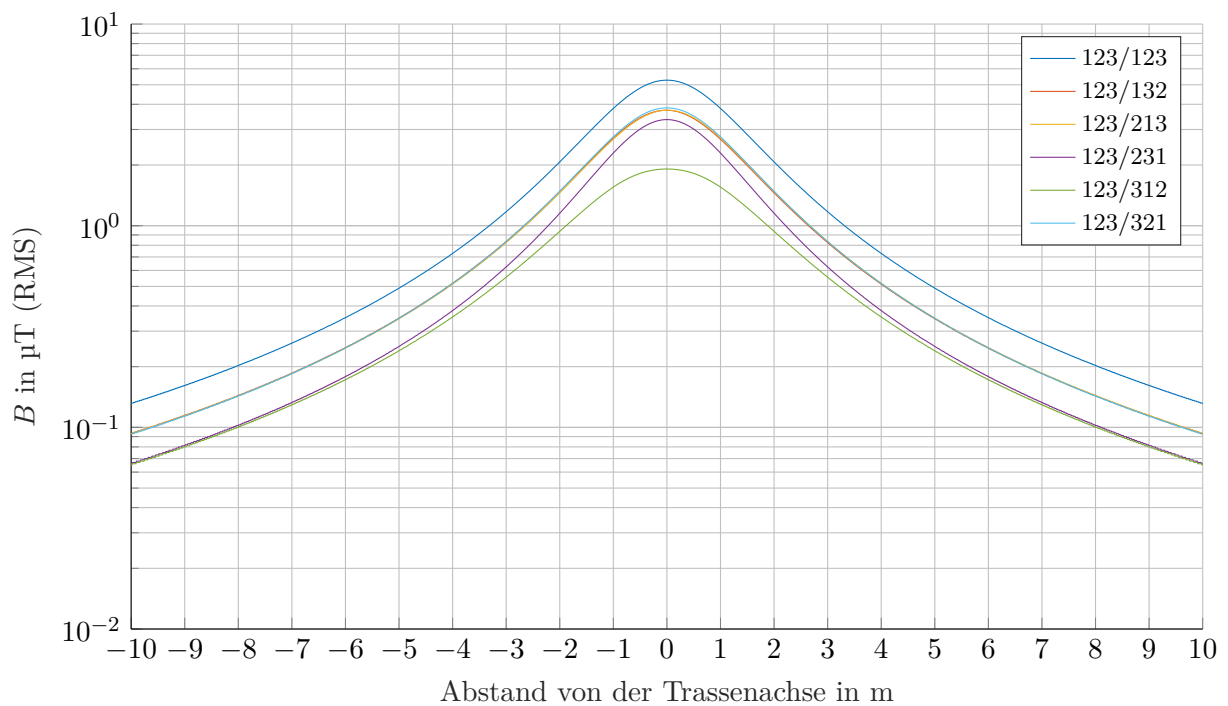


Abbildung 3.73: Magnetische Flussdichte beim Typ 630D55-2-250 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

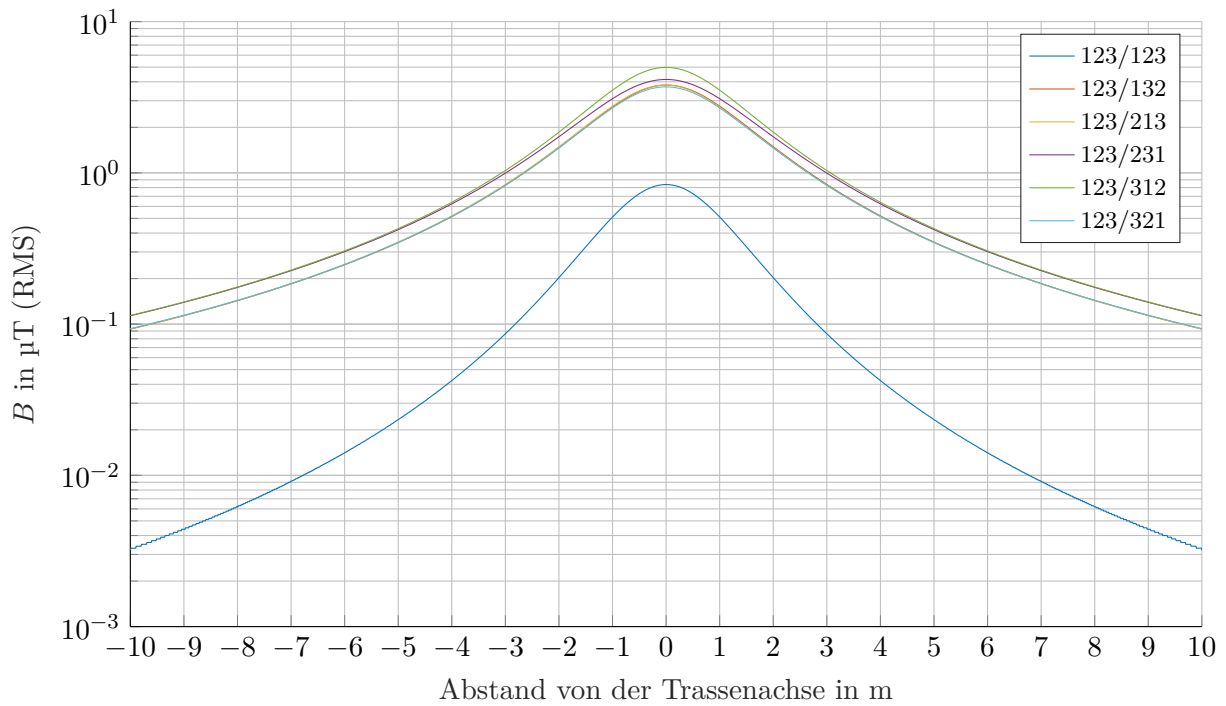


Abbildung 3.74: Magnetische Flussdichte beim Typ 630D55-2-250 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

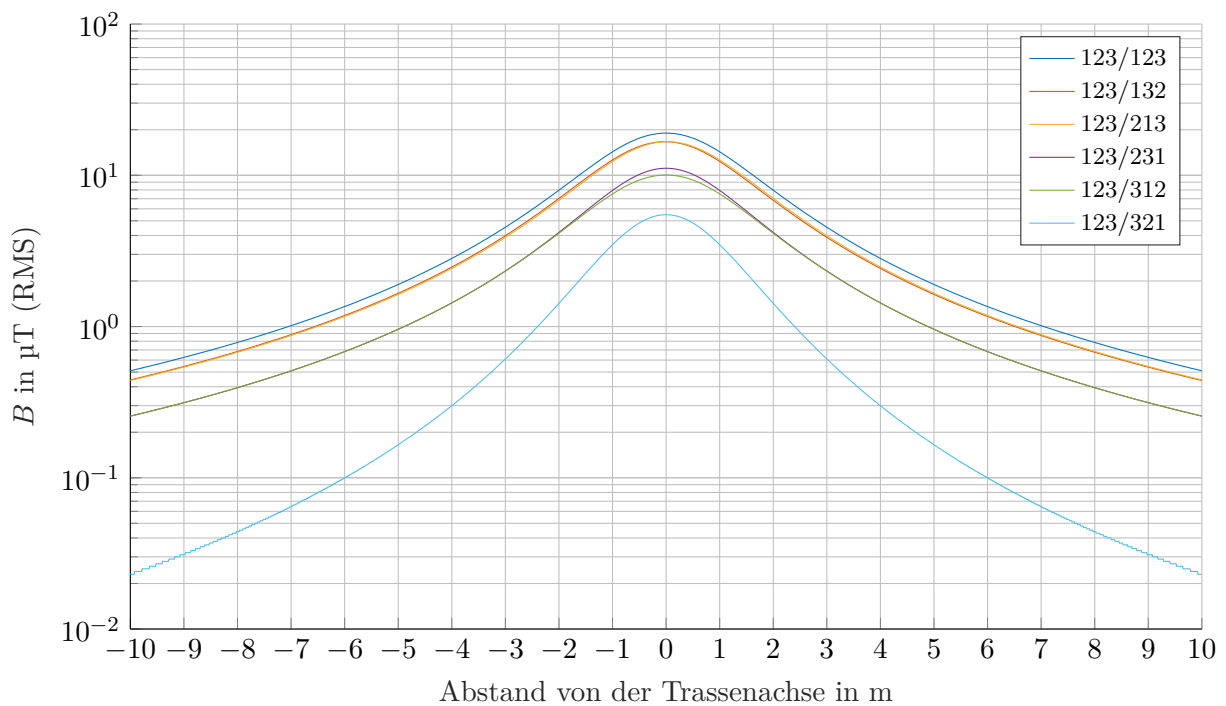


Abbildung 3.75: Magnetische Flussdichte beim Typ 630E150-2-450 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

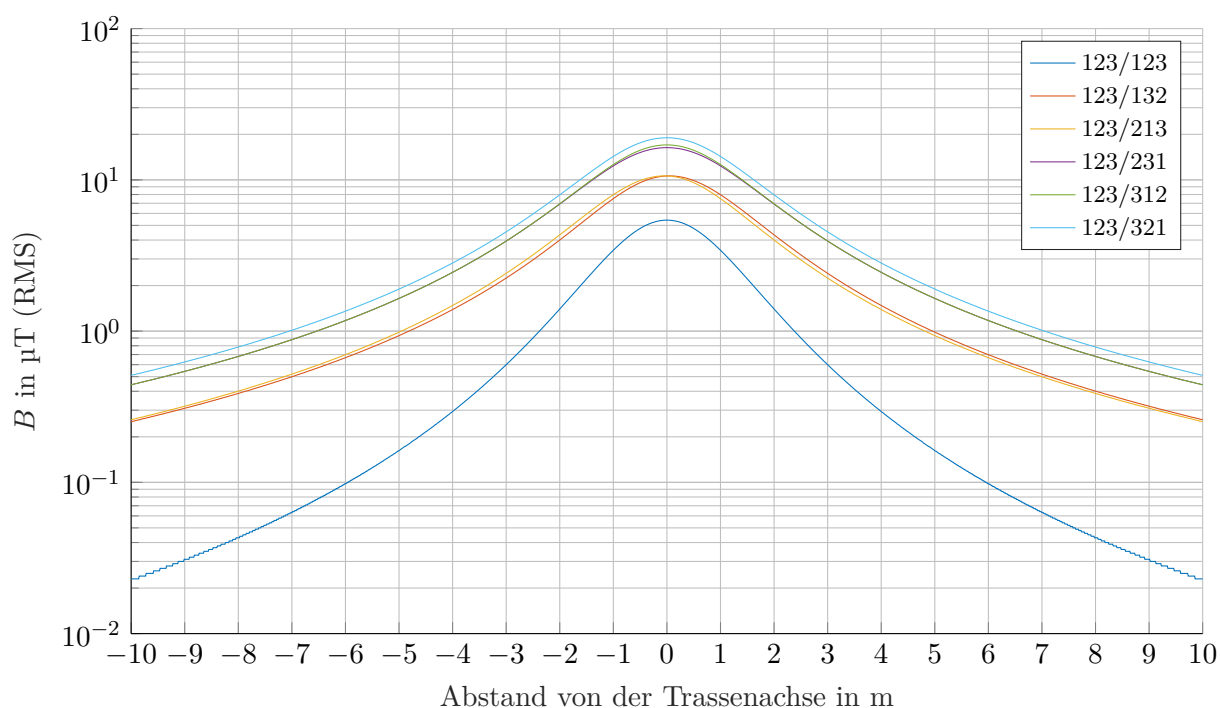


Abbildung 3.76: Magnetische Flussdichte beim Typ 630E150-2-450 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

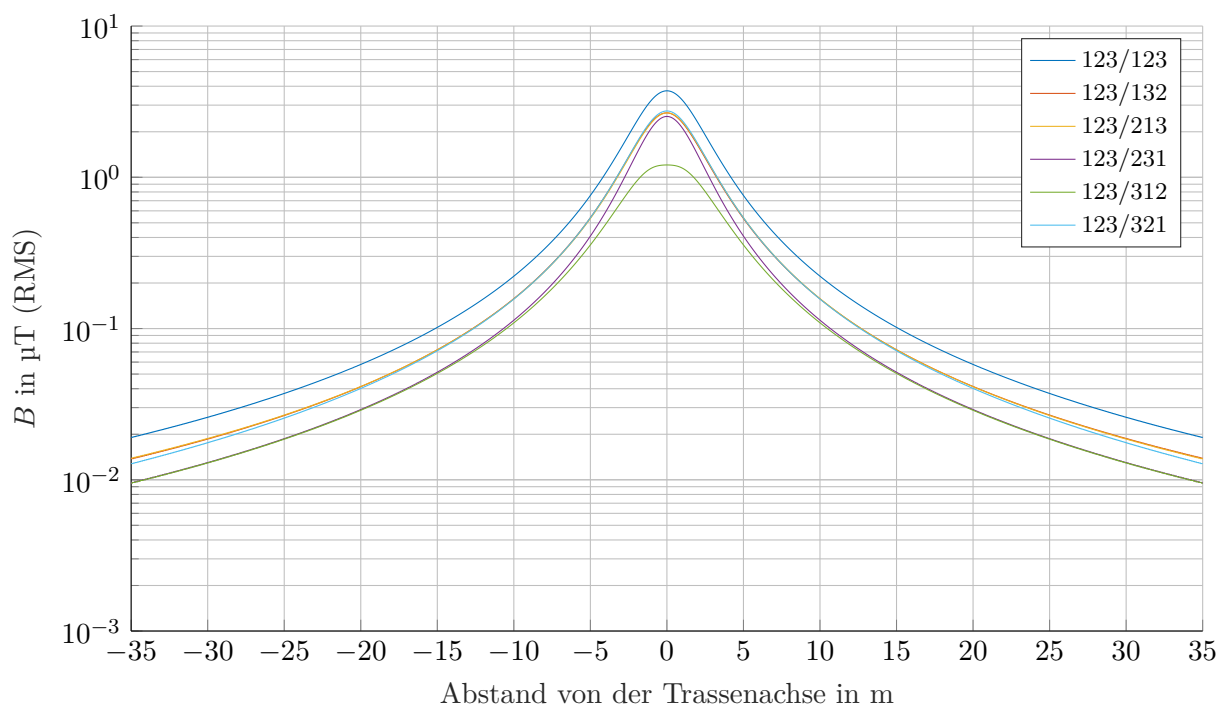


Abbildung 3.77: Magnetische Flussdichte beim Typ 1000D96-2-500 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

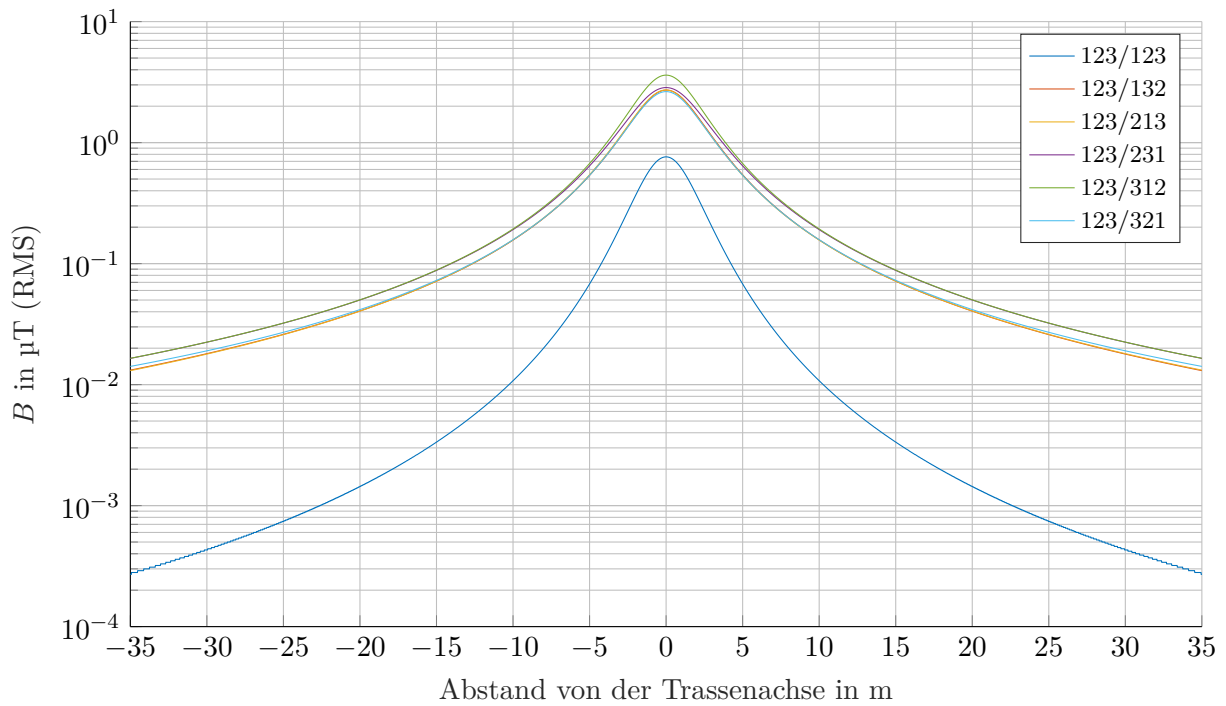


Abbildung 3.78: Magnetische Flussdichte beim Typ 1000D96-2-500 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

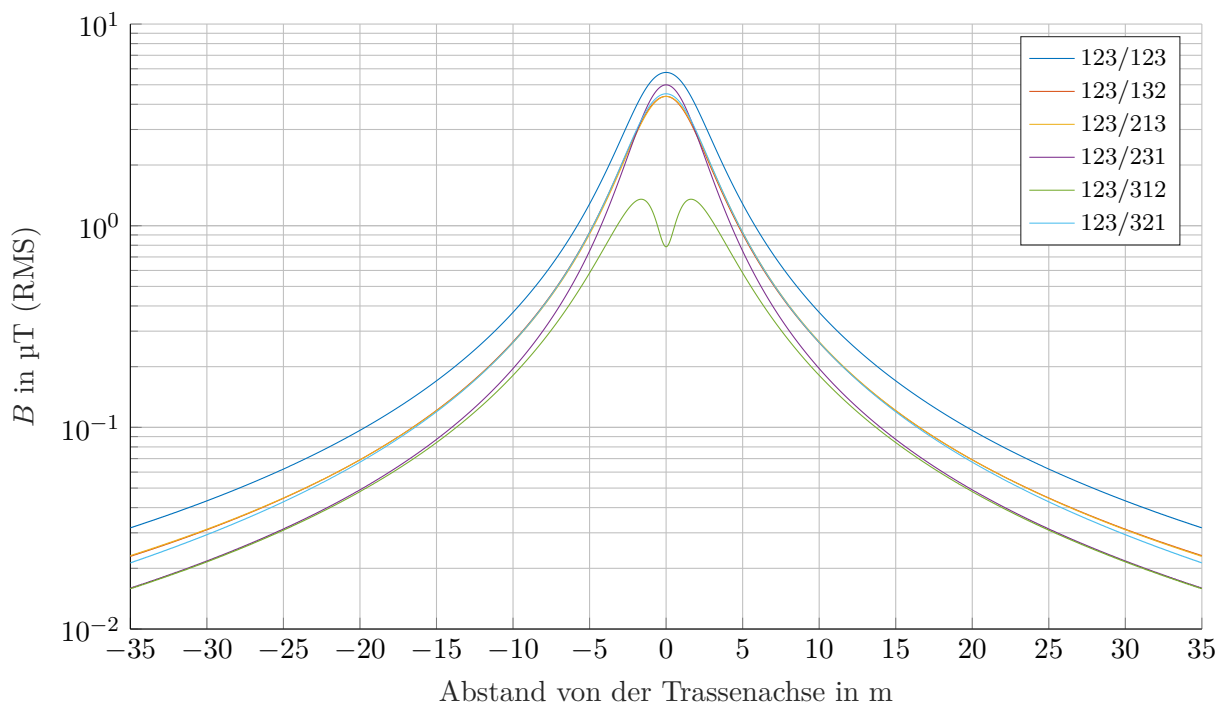


Abbildung 3.79: Magnetische Flussdichte beim Typ 1000D160-2-1000 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

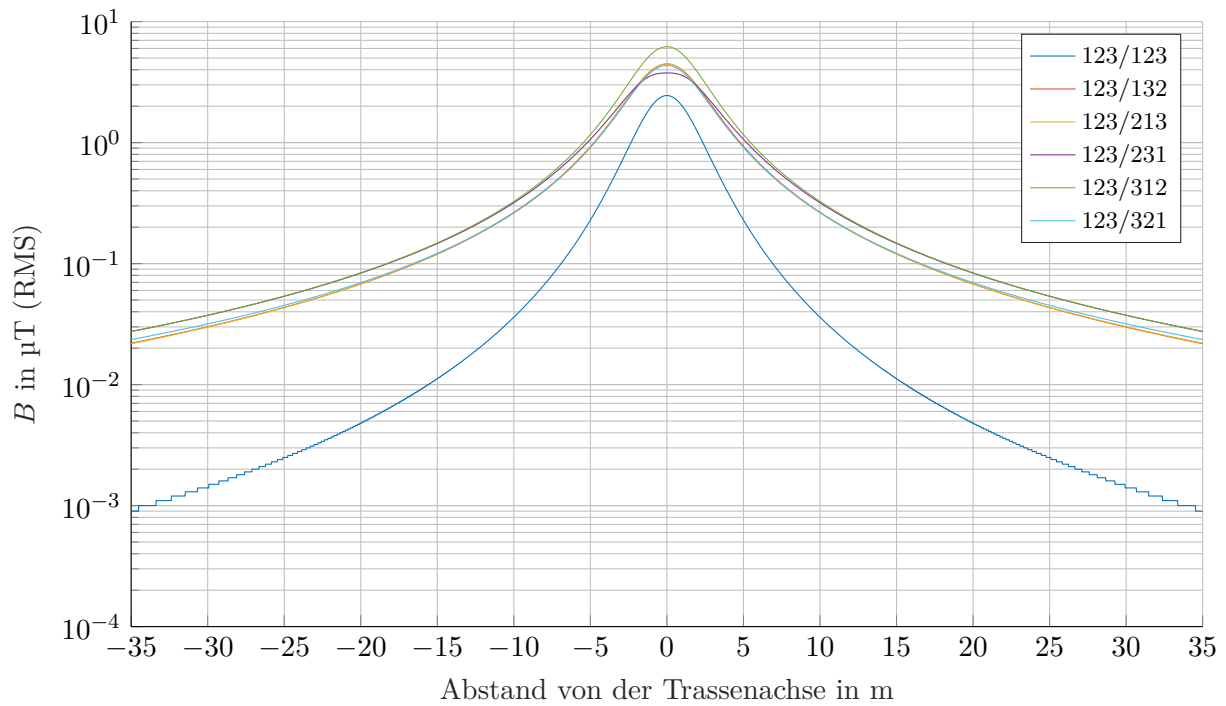


Abbildung 3.80: Magnetische Flussdichte beim Typ 1000D160-2-1000 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

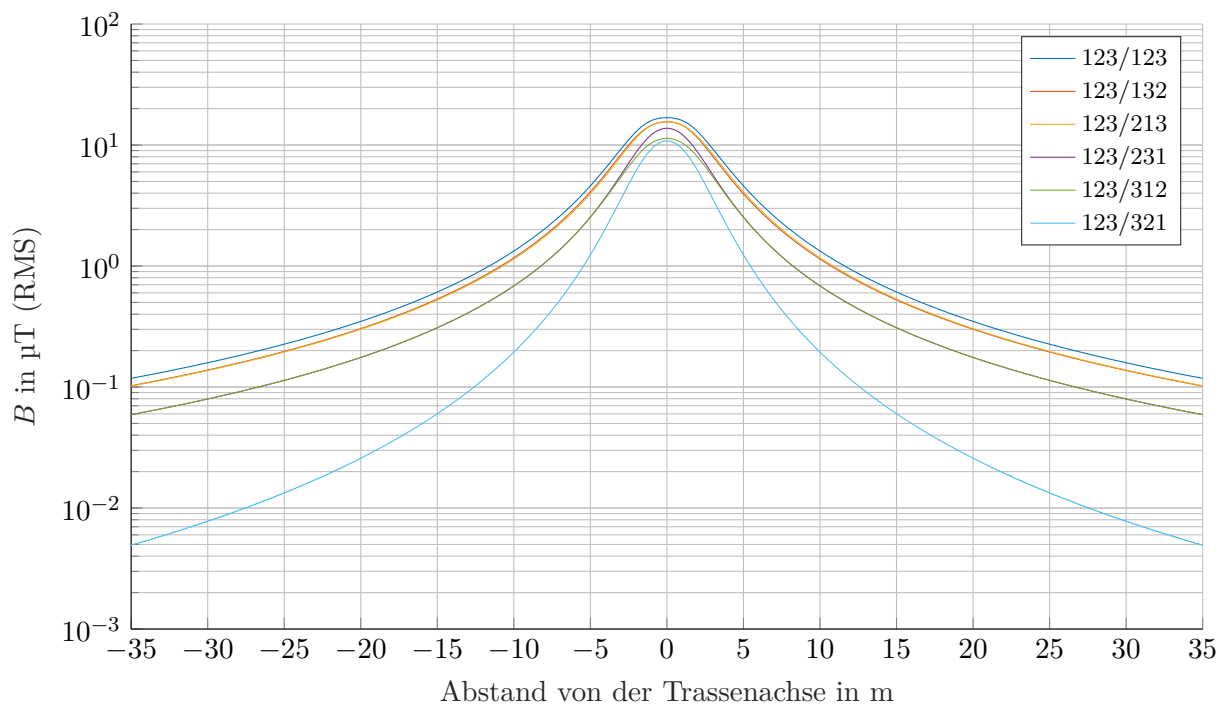


Abbildung 3.81: Magnetische Flussdichte beim Typ 2500E400-2-1500 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

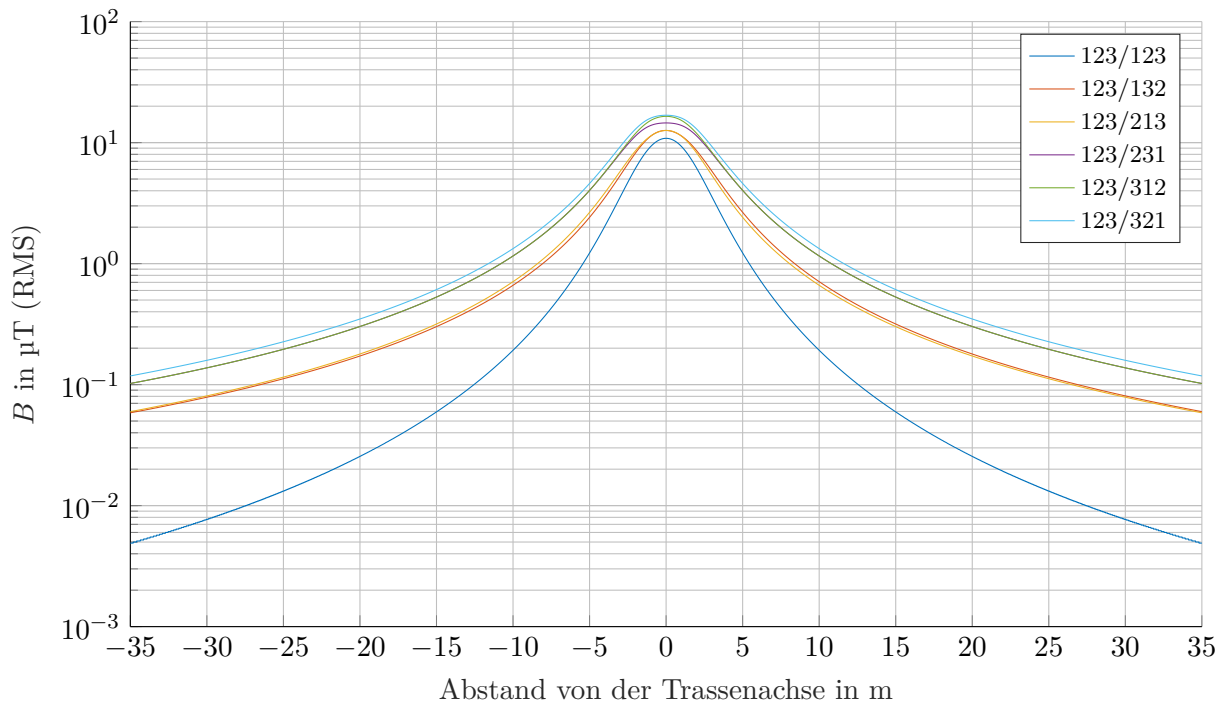


Abbildung 3.82: Magnetische Flussdichte beim Typ 2500E400-2-1500 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

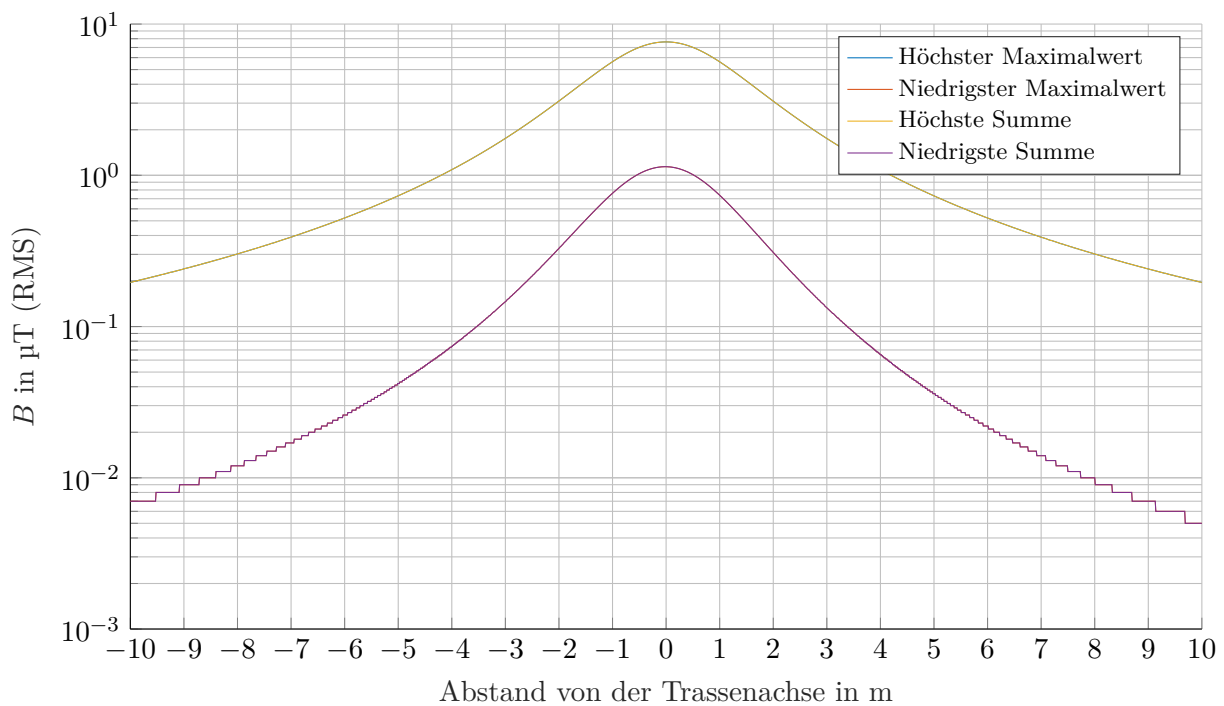


Abbildung 3.83: Extremwerte der magnetischen Flussdichte beim Typ 630D55-3-250 mit gleichsin-nigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

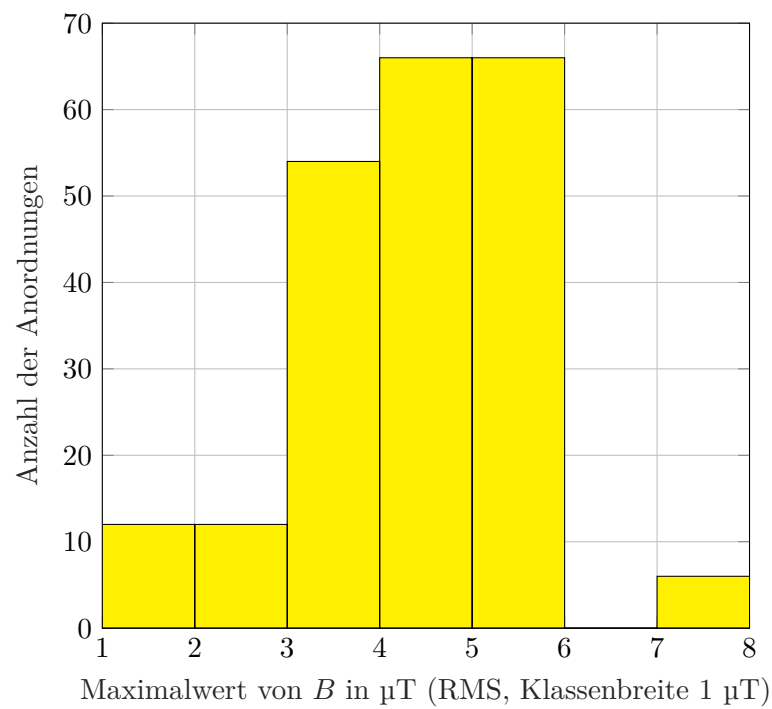


Abbildung 3.84: Häufigkeitsverteilung der magnetischen Flussdichte beim Typ 630D55-3-250 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung

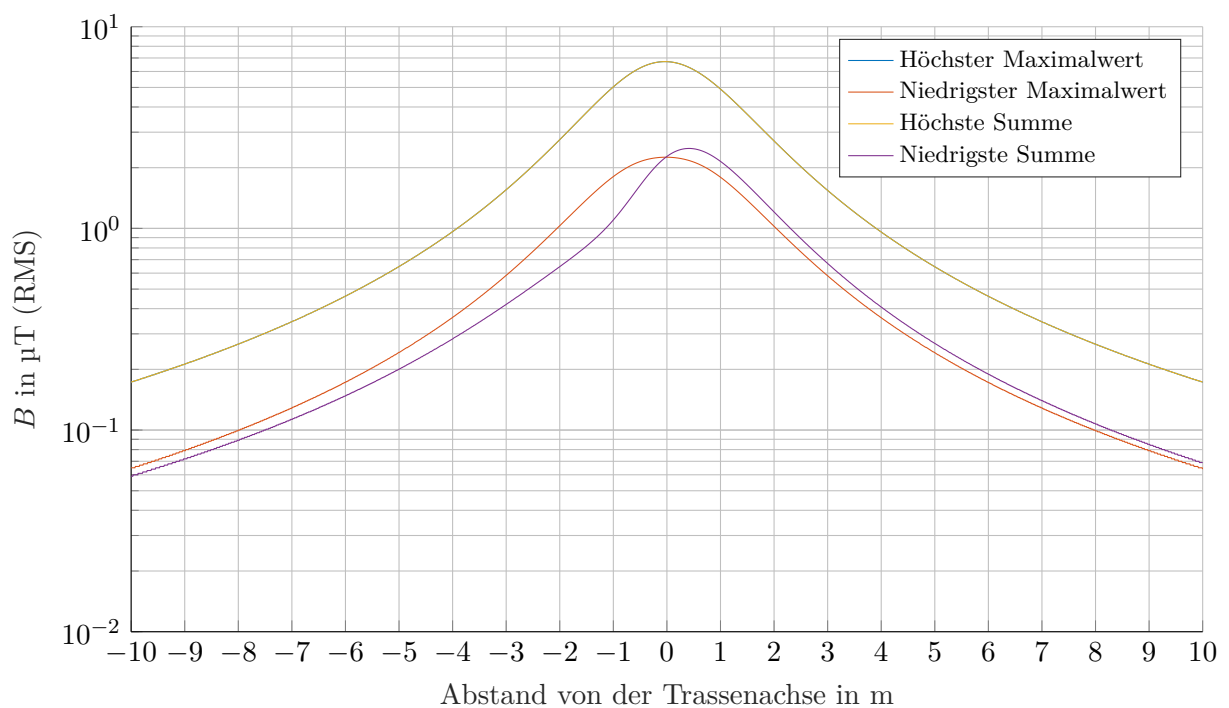


Abbildung 3.85: Extremwerte der magnetischen Flussdichte beim Typ 630D55-3-250 mit Stromfluss +++/---/+++ in Abhängigkeit von der Phasenordnung

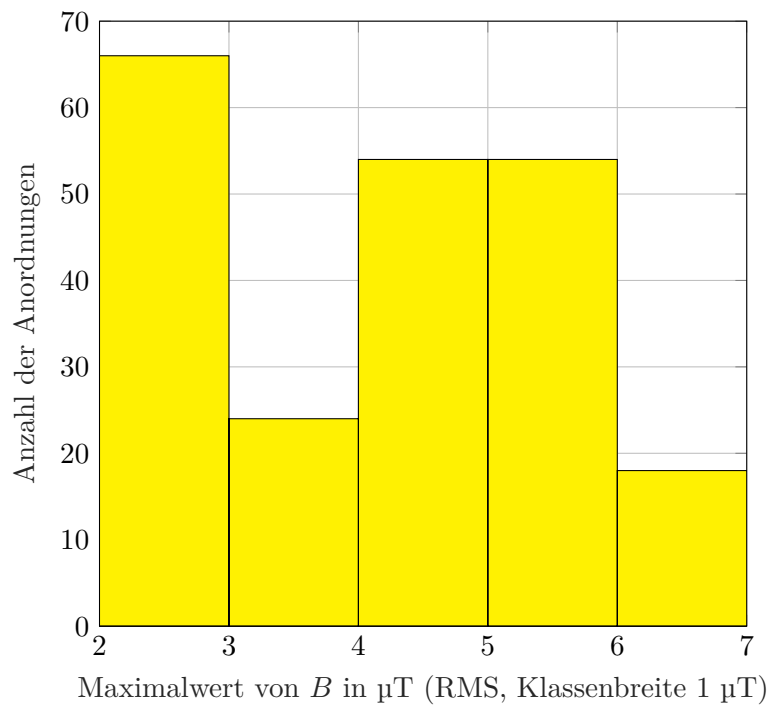


Abbildung 3.86: Häufigkeitsverteilung der magnetischen Flussdichte beim Typ 630D55-3-250 mit Stromfluss +++/---/+++ in Abhängigkeit von der Phasenordnung

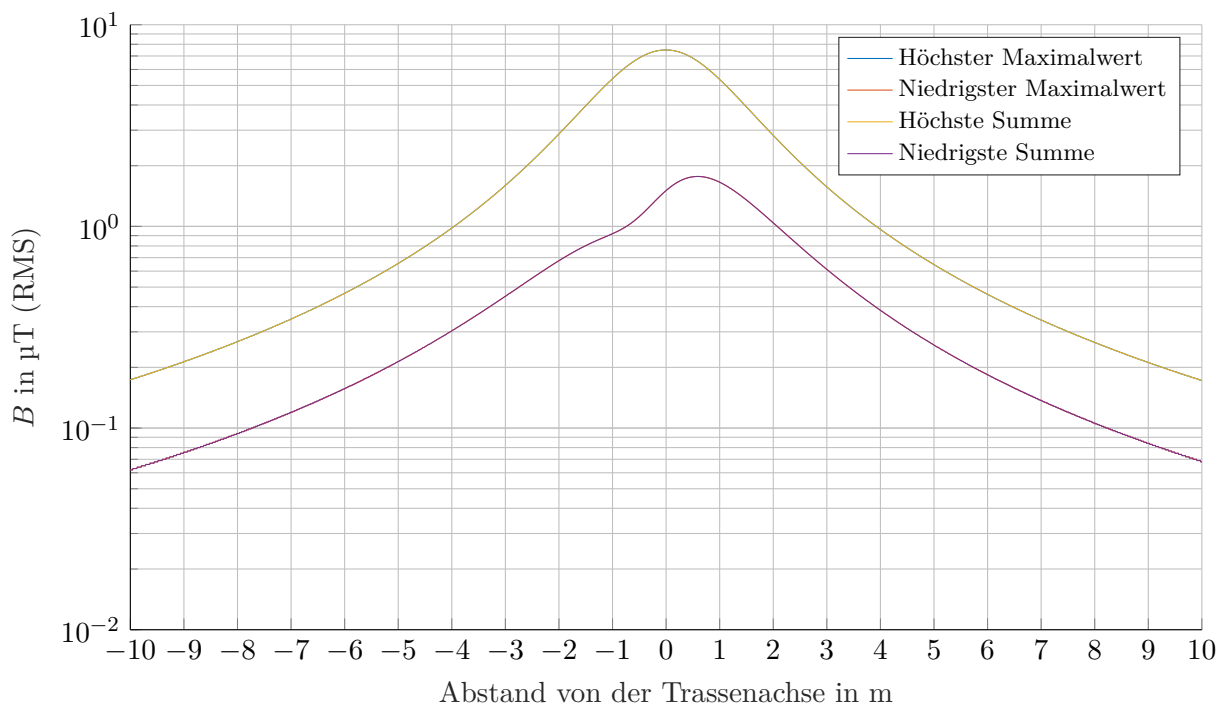


Abbildung 3.87: Extremwerte der magnetischen Flussdichte beim Typ 630D55-3-250 mit Stromfluss ---/---/+++ in Abhängigkeit von der Phasenordnung

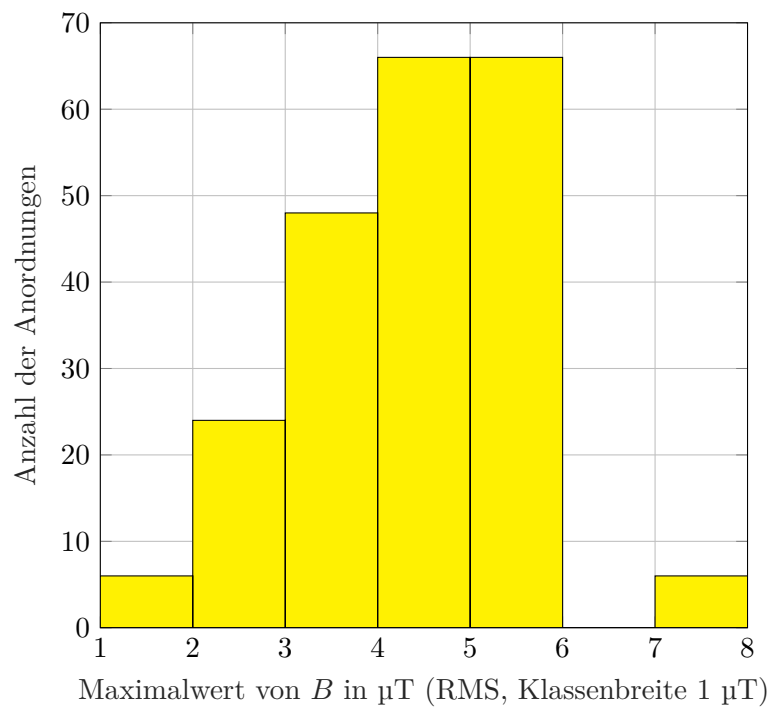


Abbildung 3.88: Häufigkeitsverteilung der magnetischen Flussdichte beim Typ 630D55-3-250 mit Stromfluss ---/---/+++ in Abhängigkeit von der Phasenanordnung

Tabelle 3.14: Phasenkombinationen mit gleicher magnetischer Flussdichteverteilung der dreisystemigen Kabelgeometrien

Geometrie	Höchster Maximalwert	Niedrigster Maximalwert	Höchste Summe	Niedrigste Summe
630D55-3-250 (gleichsinnig)	123/123/123	123/312/231	123/123/123	123/312/231
	132/132/132	132/213/321	132/132/132	132/213/321
	213/213/213	213/321/132	213/213/213	213/321/132
	231/231/231	231/123/312	231/231/231	231/123/312
	312/312/312	312/231/123	312/312/312	312/231/123
	321/321/321	321/132/213	321/321/321	321/132/213
630D55-3-250 (+++/-/-/+++)	123/312/123	123/123/123	123/312/123	123/123/312
	132/213/132	132/132/132	132/213/132	132/132/213
	213/321/213	213/213/213	213/321/213	213/213/321
	231/123/231	231/231/231	231/123/231	231/231/123
	312/231/312	312/312/312	312/231/312	312/312/231
	321/132/321	321/321/321	321/132/321	321/321/132
630D55-3-250 (---/---/+++)	123/123/312	123/312/123	123/123/312	123/312/123
	132/132/213	132/213/132	132/132/213	132/213/132
	213/213/321	213/321/213	213/213/321	213/321/213
	231/231/123	231/123/231	231/231/123	231/123/231
	312/312/231	312/231/312	312/312/231	312/231/312
	321/321/132	321/132/321	321/321/132	321/132/321

3.2.1.2 Ergebnisse für die dreisystemige Anordnung

Bei der dreisystemigen Anordnung **630D55-3-250** sollen beispielhaft drei Lastflussrichtungskombinationen betrachtet werden: zum einen eine gleichsinnig positive Lastflussrichtung und zum anderen zwei gegensinnige Lastflussrichtungen der Arten $+++ / --- / +++$ und $--- / --- / +++$. Da, wie bereits bei den viersystemigen Freileitungen, nicht von vornherein davon ausgegangen werden kann, dass es Phasenkombinationen mit identischen Feldstärke- bzw. Flussdichteverläufen gibt, müssen sämtliche $6^3 = 216$ Phasenanstellungen berechnet und verglichen werden.

In den Abbildungen 3.83, 3.85 und 3.87 sind die Extremwerte der Querschnitte der magnetischen Flussdichte aller drei Fälle zu sehen. Wie bei den viersystemigen Freileitungen sind diejenigen Verteilungen mit der höchsten bzw. niedrigsten Summe über den Querschnitt und mit dem höchsten bzw. niedrigsten Maximalwert dargestellt. In den Abbildungen 3.84, 3.86 und 3.88 finden sich die jeweiligen Häufigkeitsverteilungen des Maximalwerts der magnetischen Flussdichte über alle 216 Phasenanstellungen. Es ist zu erkennen, dass mit den feldoptimalen Phasenanstellungen die magnetische Flussdichte über den ganzen Querschnitt deutlich verringert werden kann; dies gilt insbesondere im Fall des gleichsinnigen Stromflusses. In den Histogrammen zeigt sich, dass bei gleichsinnigem Stromfluss und bei der Lastflussrichtung $--- / --- / +++$ nur wenige Phasenanstellungen mit geringen Flussdichte-Maximalwerten existieren, während bei der Stromflussrichtung $+++ / --- / +++$ das Gegenteil der Fall ist.

Für alle drei Fälle wurde jeweils ein Vergleich aller Flussdichte-Querschnitte ausgeführt, um festzustellen, ob identische Verteilungen darunter sind. Es zeigt sich, dass es, analog zu den zweisystemigen Anordnungen [20], jeweils sechs Phasenanstellungen mit gleichem resultierenden Flussdichte-Querschnitt gibt (siehe Tabelle 3.14). Ferner fallen bei gleichsinnigem Stromfluss und bei der Stromflussrichtung $--- / --- / +++$ diejenigen Phasenanstellungen mit niedrigstem Maximalwert und niedrigster Summe zusammen. Besonders bemerkenswert ist, dass diejenigen Phasenanstellungen, die bei der Lastflussrichtung $+++ / --- / +++$ für den geringsten Maximalwert sorgen, bei gleichsinnigem Lastfluss zu dem höchsten Maximalwert bzw. zur höchsten Summe führen. Entsprechendes gilt für die Phasenanstellungen, die bei der Lastflussrichtung $+++ / --- / +++$ für die niedrigste Flussdichtesumme sorgen – diese stellen bei der Lastflussrichtung $--- / --- / +++$ die Anordnungen mit dem höchsten Maximalwert bzw. mit der höchsten Summe dar. Umgekehrt sind die Phasenanstellungen, die bei Lastflussrichtung $--- / --- / +++$ für den niedrigsten Maximalwert bzw. für die niedrigste Summe sorgen, identisch mit den ungünstigsten Phasenanstellungen der Lastflussrichtung $+++ / --- / +++$.

3.2.1.3 Bewertung

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es bei den zweisystemigen Erdkabeln sowohl bei gleich- als auch bei gegensinnigem Stromfluss jeweils eine Phasenanstellung gibt, die über den gesamten Einwirkungsbereich die geringsten Flussdichtewerte hervorruft. Allerdings sorgt genau dieselbe Phasenanstellung für die höchsten Flussdichtewerte, wenn sich die Lastflussrichtung umkehrt. Ähnliches gilt im Falle der dreisystemigen Erdkabel. Da, wie eingangs beschrieben, in Zeiten der Energiewende im Hoch- und im Mittelspannungsnetz keine vorherrschende Lastflussrichtung mehr festzustellen ist, scheidet die Feldminimierung durch Optimieren der Phasenanstellung in der Re-

gel aus. Allenfalls in (groß)städtischen Gebieten, in denen der Verbrauch die Erzeugung deutlich überwiegt, kommt diese Maßnahme in Betracht. In diesem Fall ist aber zu beachten, dass bei der Parallelführung von Stromkreisen unterschiedlicher Teilnetze die Phasenlage der Drehstromsysteme zueinander Schwankungen unterliegt. Dies entspräche beispielsweise einem Wechsel der Phasenanzahl von 123 / 321 auf 123 / 132, wodurch die Optimierung wieder zunichtegemacht würde. Eine weitere Ausnahme besteht bei parallel geschalteten Kabelsystemen, da hier in allen Fällen eine gleichsinnige (und auch phasengleiche) Stromflussrichtung vorliegt. Dies bringt allerdings die bereits in Abschnitt 3.1.1.6 beschriebenen Nachteile mit sich und kommt daher nur in Ausnahmefällen vor.

3.2.2 Optimieren der Verlegetiefe

Die 26. BImSchVV schreibt dazu in ihrem Abschnitt 5.3.2.4:

„Die Erdkabel werden tief im Boden verlegt.

Voraussetzungen: Die Bodenbeschaffenheit und die vor Ort vorhandene Infrastruktur müssen für eine tiefe Verlegung geeignet sein. Die Maßnahme ist bei allen Drehstromerkabeln möglich und kann bei Neubau realisiert werden.

Wirksamkeit: Die Wirksamkeit hängt von der Verlegetiefe ab. In Trassennähe ist sie hoch und nimmt mit zunehmendem Abstand zur Trasse ab.

Hinweis: Bei größerer Verlegetiefe verschlechtert sich die Wärmeabfuhr mit möglichen Konsequenzen für Kabel und Boden“.

Es soll im Folgenden der Querschnitt der magnetischen Flussdichte über den Einwirkungsbereich bei Veränderung der Verlegetiefe untersucht werden. Aus den Abbildungen in Abschnitt 3.2.1 ist ersichtlich, dass die Flussdichteverläufe der Mittelspannungskabel mit 240 und 630 mm² Querschnitt bei gleicher Verlegeweise sehr ähnlich sind. Es sollen daher nur die ein-, zwei- und dreisystemigen Mittelspannungskabel mit 630 mm² Querschnitt sowie die ein- und zweisystemigen Hochspannungskabel berücksichtigt werden. Als Stromflussrichtung wird in allen Fällen gleichsinnig positiver Stromfluss der Phasenanzahl 123, 123 / 123 bzw. 123 / 123 / 123 angenommen. Bei den Mittelspannungskabeln soll die Verlegetiefe, ausgehend von den oben angenommenen 60 cm, in Schritten von 20 cm bis auf 1,4 m erhöht werden. Im Falle der Hochspannungskabel werden die vier Verlegetiefen 120, 150 (siehe oben), 180 und 210 cm untersucht. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 3.89 bis 3.99 dargestellt.

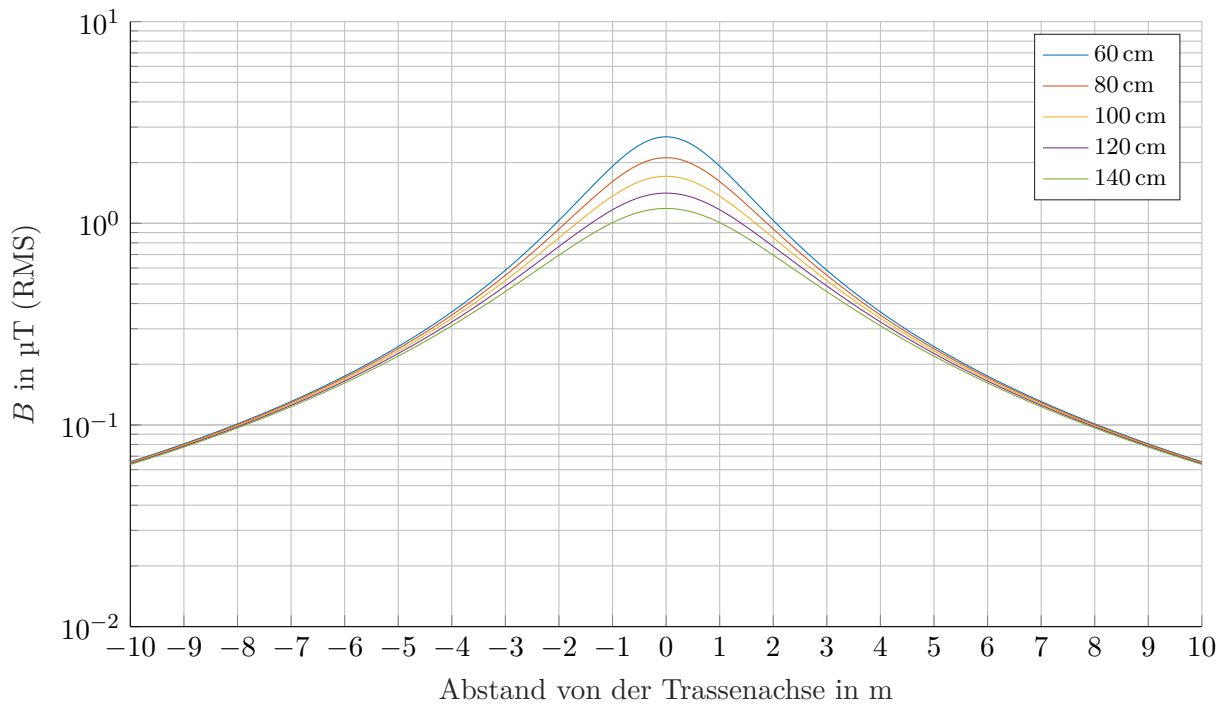


Abbildung 3.89: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 630D55

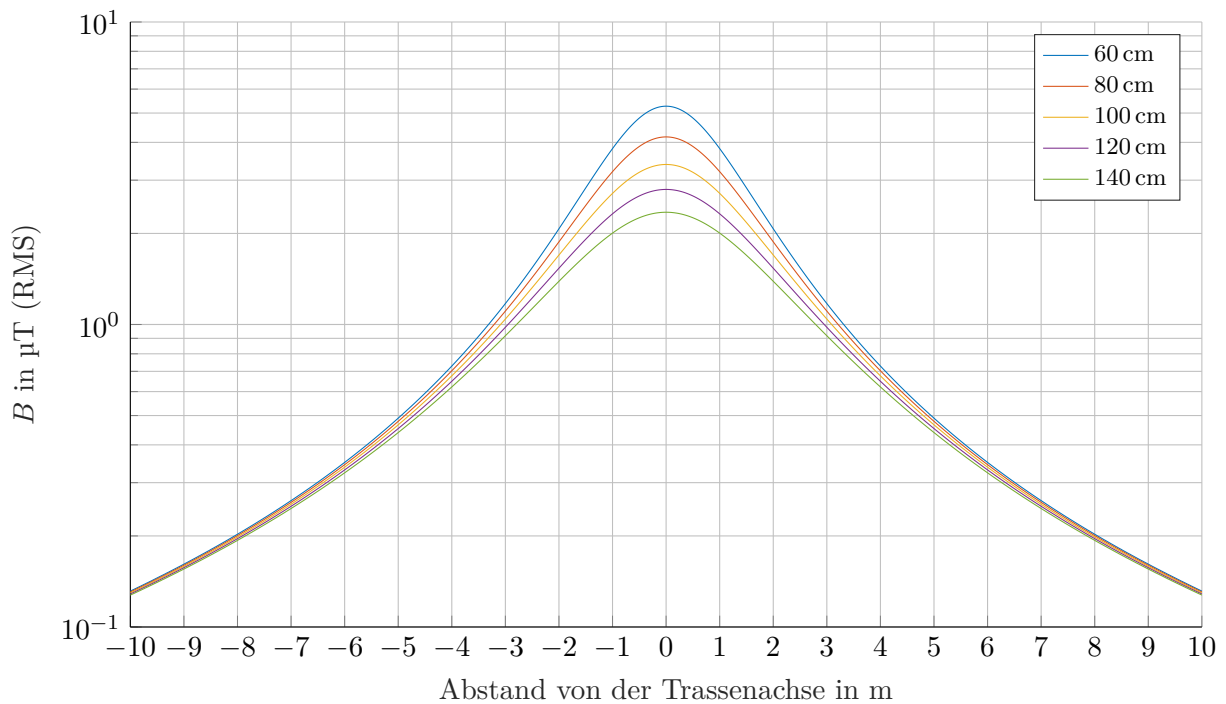


Abbildung 3.90: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 630D55-2-250

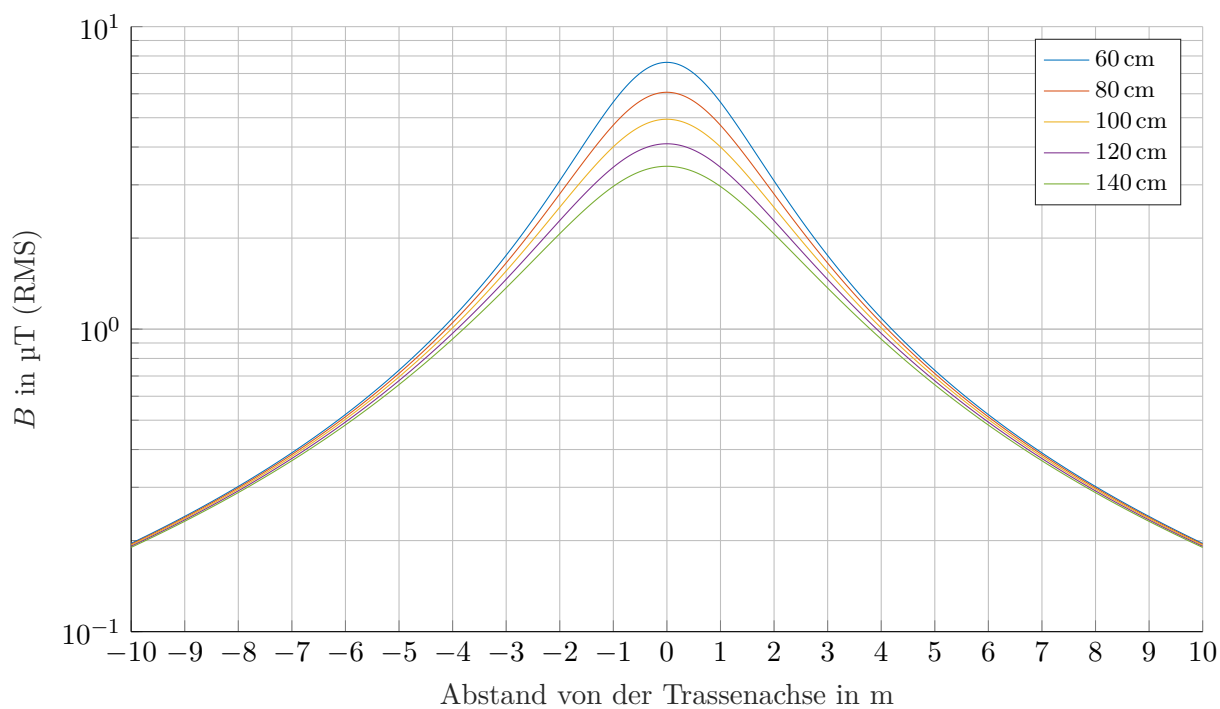


Abbildung 3.91: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 630D55-3-250

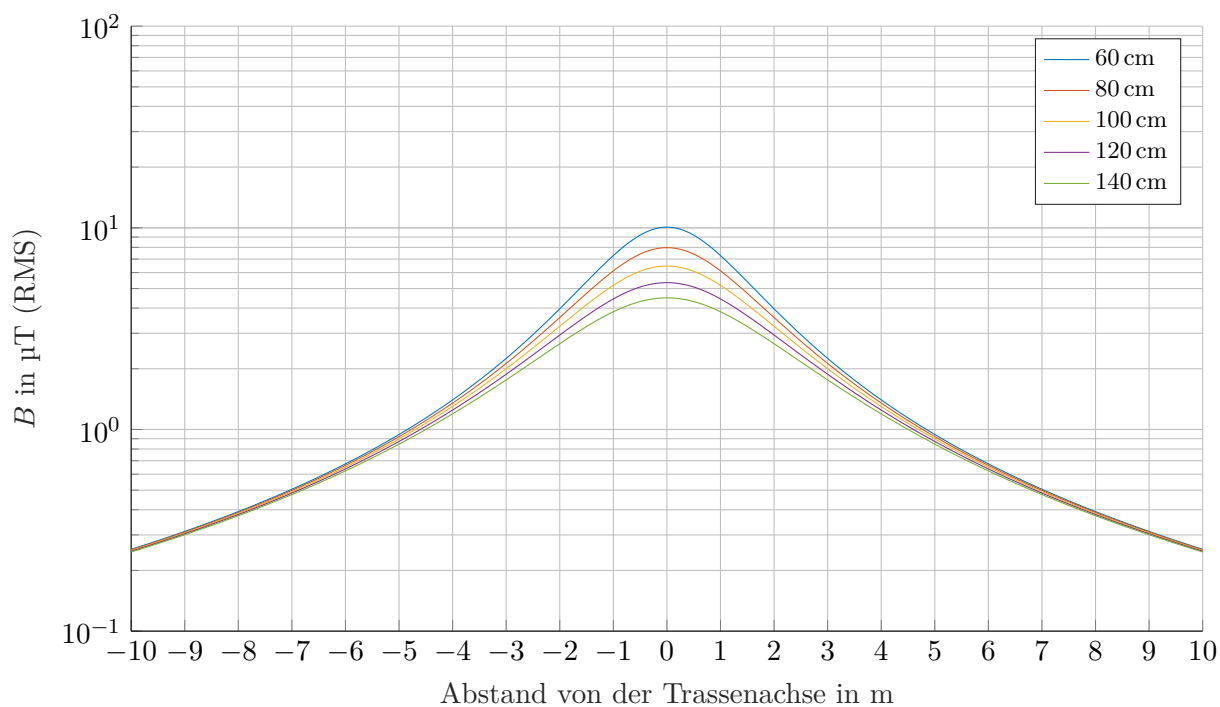
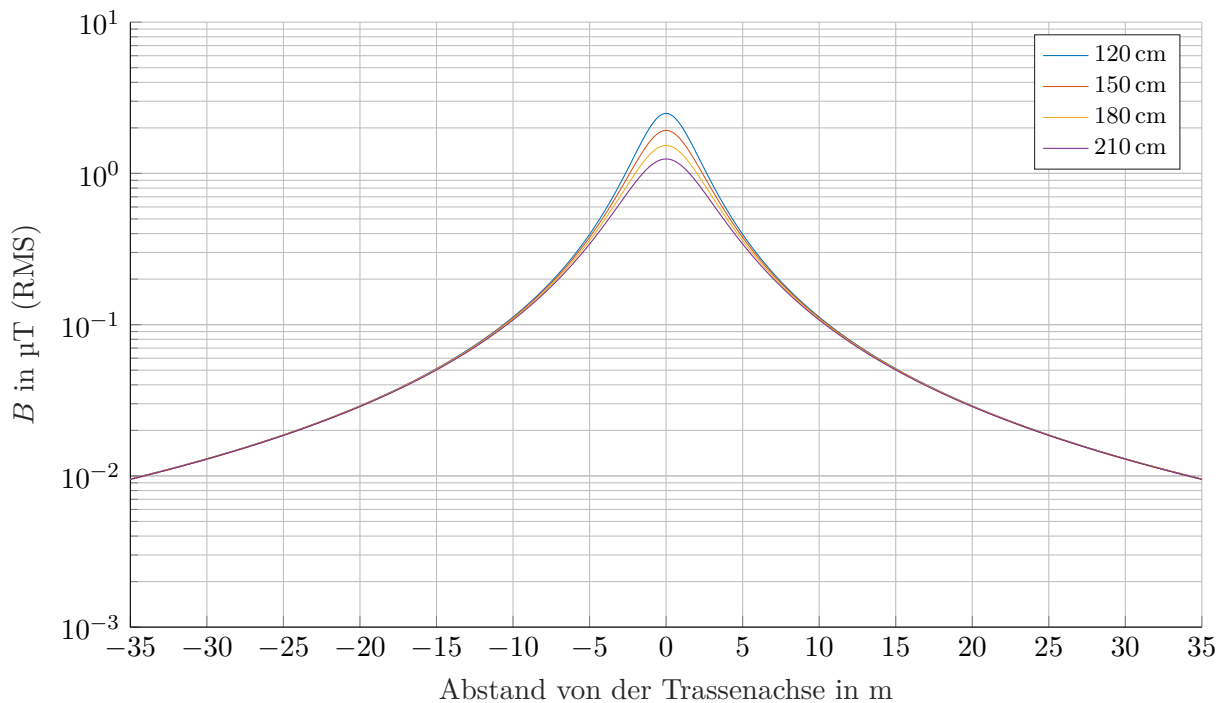
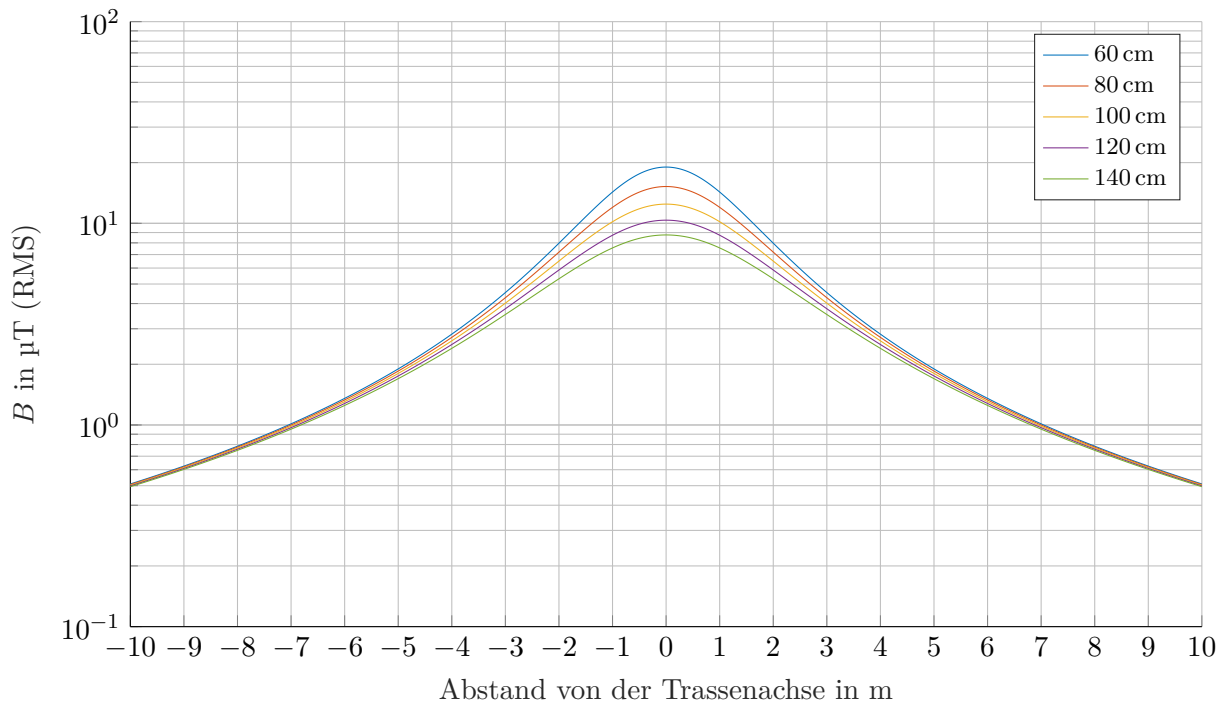


Abbildung 3.92: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 630E150



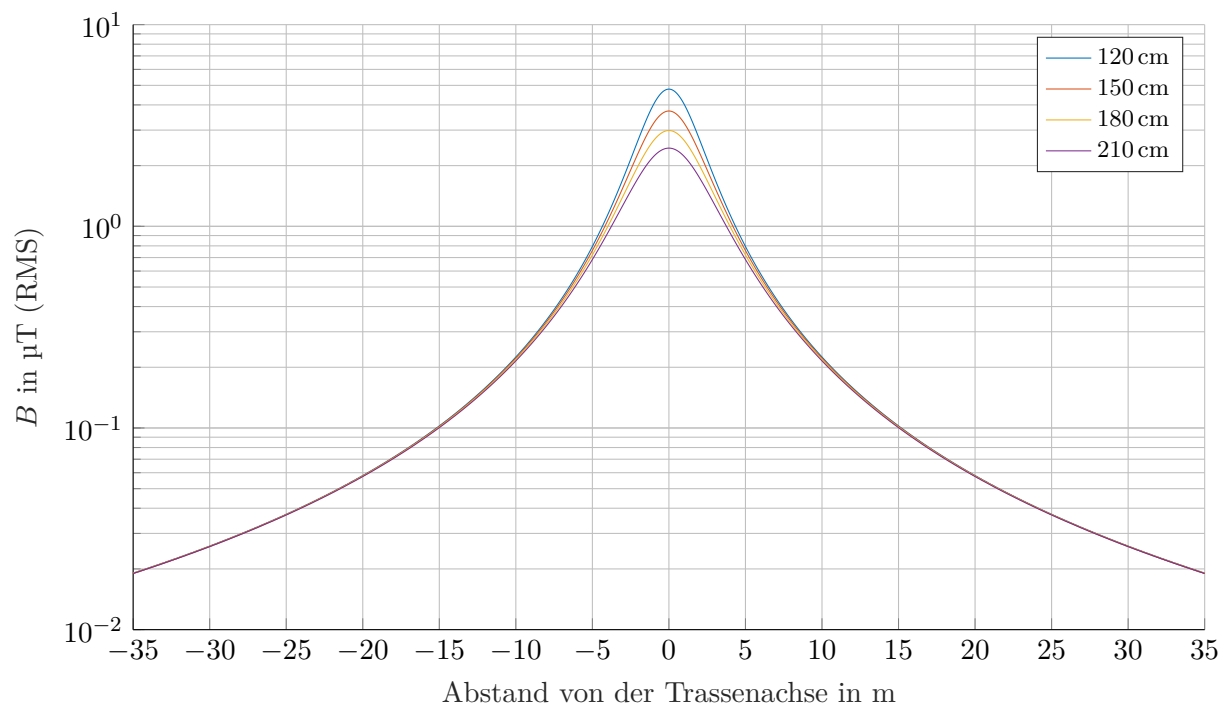


Abbildung 3.95: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 1000D96-2-500

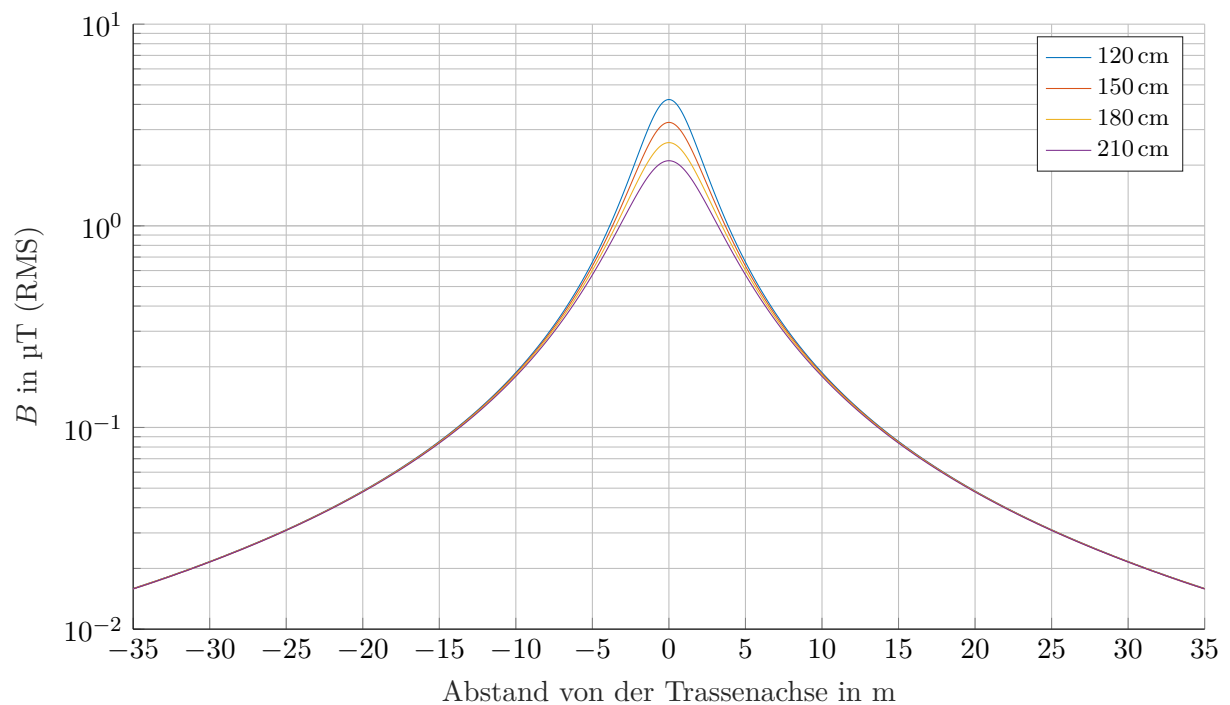


Abbildung 3.96: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 1000D160

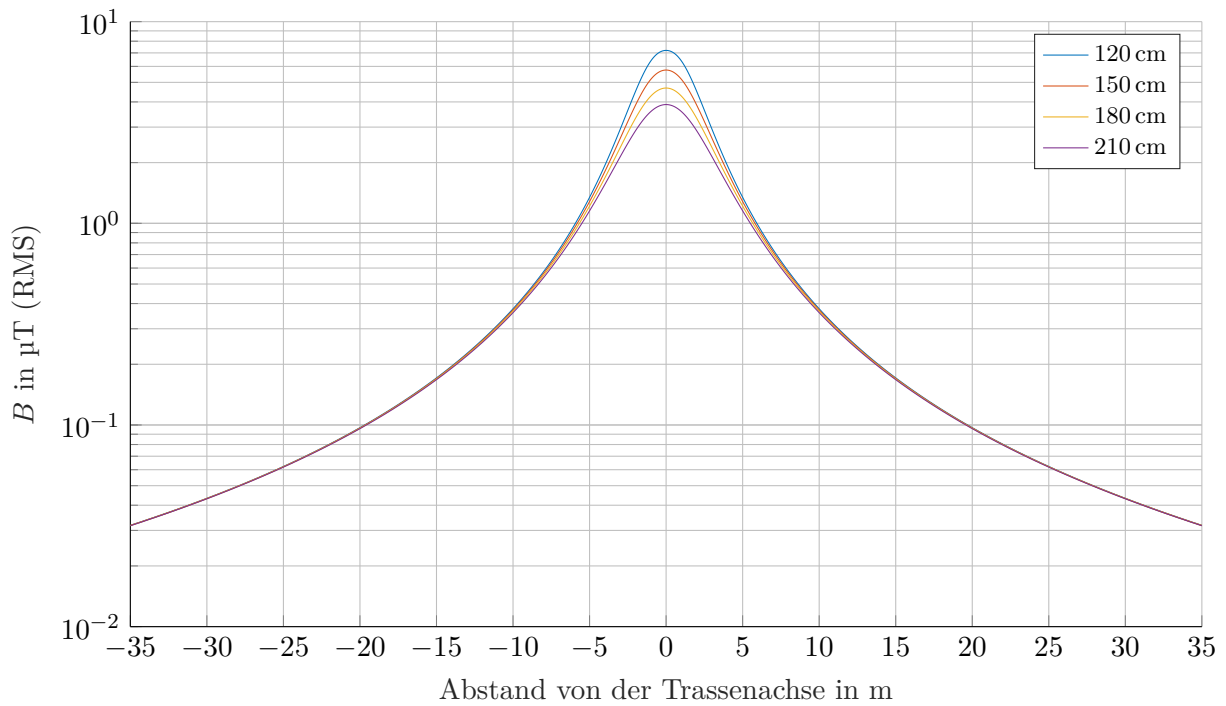


Abbildung 3.97: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 1000D160-2-1000

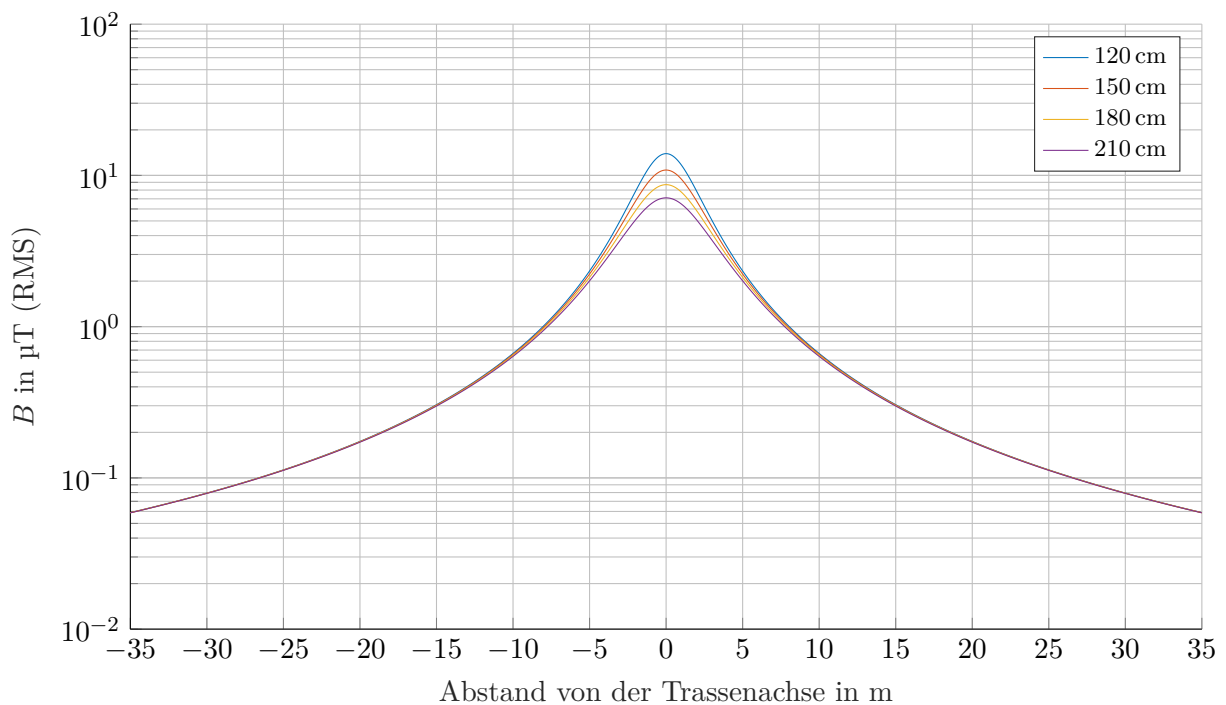


Abbildung 3.98: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 2500E400

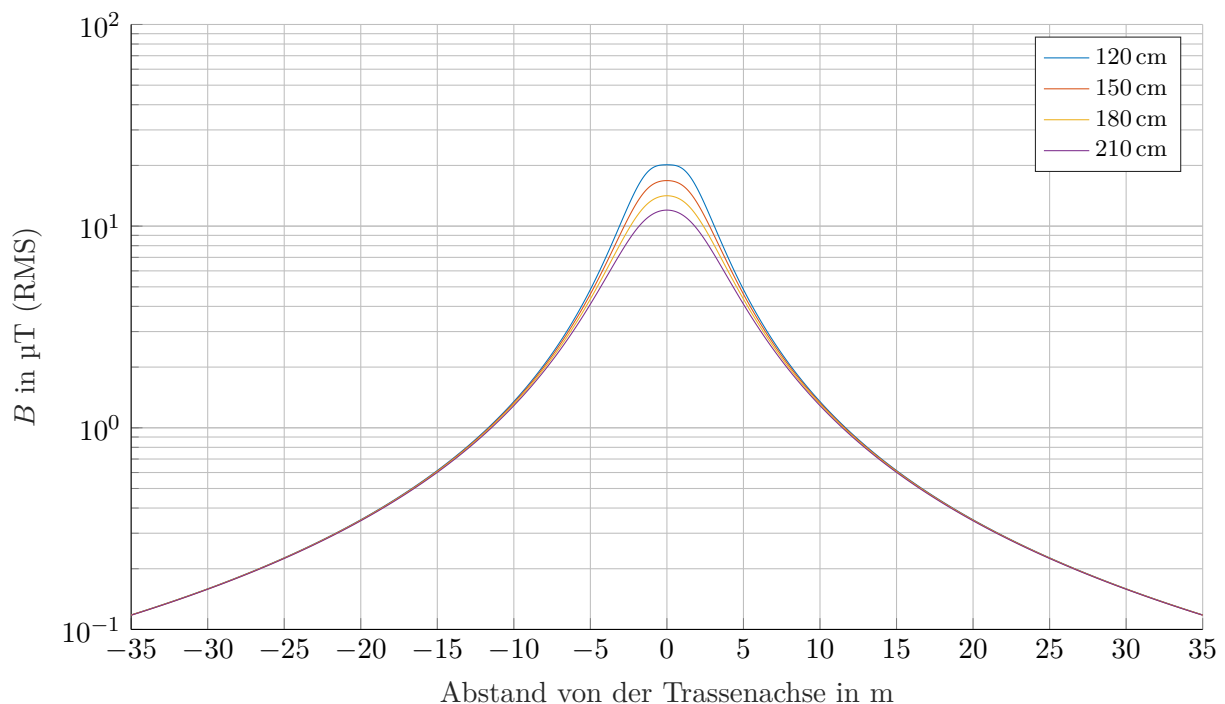


Abbildung 3.99: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 2500E400-2-1500

Es zeigt sich erwartungsgemäß, dass die magnetische Flussdichte in allen Fällen mit steigender Verlegetiefe abnimmt. Allerdings ist der Minderungseffekt nur im Bereich weniger Meter um die Trassenachse herum deutlich sichtbar; im übrigen Einwirkungsbereich lässt sich kein nennenswerter Einfluss der Verlegetiefe auf die Flussdichte mehr erkennen, während gleichzeitig die absoluten Werte der Flussdichte schon im Bereich unter $1 \mu\text{T}$ liegen. Insgesamt erscheint die Tieferlegung von Kabeln, jedenfalls im Nahbereich, als wirksames Mittel zur Feldminimierung. Diese Feststellung steht im Einklang mit der 26. BImSchVVwV.

Wie bereits in Abschnitt 3.2 erwähnt, existiert bei der gemeinsamen Benutzung einer Trasse durch mehrere Arten von Versorgungsleitungen eine Spartenkonvention, die die genaue Lage der jeweiligen Leitungen festlegt. Der Zone für die Stromversorgung benachbart sind die Zonen für die Gasversorgung und für die Telekommunikationsleitungen [32], deren Leitungen sich üblicherweise in ähnlichen Tiefen befinden wie die Mittelspannungskabel. Werden Mittelspannungskabel tiefer verlegt als gewöhnlich, so wird auch deren Zugänglichkeit für eventuelle Wartungsarbeiten erschwert – schließlich bleibt die Verlegetiefe der unmittelbar benachbarten Leitungen, die bei den Bauarbeiten nicht beschädigt werden dürfen, unverändert. Dies gilt erst recht für die Tieferlegung eines Hochspannungskabels im städtischen Bereich. Lediglich an sehr dünn oder gar nicht besiedelten Orten ist das alleinige Auftreten von Mittel- und Hochspannungskabeln denkbar. Gleichzeitig ist das Vorhandensein maßgeblicher Minimierungsorte innerhalb des Einwirkungsbereichs in solchen Gegenden unwahrscheinlich. Abgesehen davon bringt die tiefere Verlegung von Erdkabeln, bedingt durch zusätzlich erforderliche Spundwände und/oder eine breitere Ausführung des Grabens, teilweise überproportional hohe Baukosten mit sich. Werden Kabel in bereits vorhandene Leerrohre

eingezogen, scheidet eine Tieferlegung von vornherein aus. Insgesamt erscheint die praktische Bedeutung dieser Minimierungsmaßnahme gering.

3.2.3 Minimieren der Kabelabstände

Die 26. BImSchVVwV schreibt dazu in ihrem Abschnitt 5.3.2.1:

„Die Kabel werden mit möglichst geringem Abstand zueinander verlegt; hierzu gehört auch die Minimierung der Kabelabstände innerhalb eines Stromkreises und zu anderen Stromkreisen.

Voraussetzungen: Die Maßnahme ist bei allen Erdkabelsystemen möglich. Wird ein Stromkreis in einem einzigen Kabel geführt, kann der Abstand zu anderen Stromkreisen minimiert werden. Die Maßnahme kann bei Neubau grundsätzlich realisiert werden. Mindestkabelabstände können erforderlich sein, um thermische Belastungen der Kabel zu begrenzen.

Wirksamkeit: Die Wirksamkeit ist hoch und wird von anderen Anlagenparametern beeinflusst und ist abhängig vom Abstand zu den Leitern.

Hinweise: Die Verringerung von Kabelabständen kann zu einer Erwärmung im Boden führen. Der zusätzliche Aufwand bei einer neu zu bauenden Leitung ist gering“.

Es ist nicht klar, wieso die 26. BImSchVVwV davon ausgeht, dass der Abstand zwischen zwei Systemen nur verringert werden könne, wenn jeweils drei Phasen in einem gemeinsamen Dreileiterkabel geführt werden. Hinsichtlich der Feldverteilung besteht zwischen drei einzelnen Phasenleitern und einem Dreileiterkabel bei gleicher geometrischer Anordnung kein Unterschied. Es sollen daher in diesem Abschnitt weiterhin die bisher betrachteten Geometrien untersucht werden.

3.2.3.1 Minimieren des Phasenleiter-Achsabstands

Beim Vergleich der Flussdichtequerschnitte der Mittelspannungskabel mit 240 und 630 mm² in Abschnitt 3.2.1 ist zu erkennen, dass im Falle der Dreieckverlegung die Kurven bei allen Phasenbelegungen dieselbe Form haben, jedoch bei 240 mm² Querschnitt insgesamt etwas niedriger liegen als bei 630 mm². Da die übrigen Abstände und technischen Parameter zwischen beiden Querschnitten gleich sind, kann dieser Flussdichteunterschied nur auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass bei 240 mm² Querschnitt die Phasenleiter aufgrund ihres geringeren Durchmessers dichter beisammen liegen. Dafür spricht auch, dass die magnetischen Flussdichten beider Kabelquerschnitte bei Einebene-Verlegung, wo der angenommene Phasenleiter-Achsabstand unabhängig vom Kabelquerschnitt ist, keinen erkennbaren Unterschied aufweisen. Derselbe Schluss ergibt sich ebenso beim Vergleich von Abbildung 3.94 mit Abbildung 3.96. Insgesamt dürfte die feldminimierende Wirkung eines geringeren Phasenleiter-Achsabstands unstrittig, aber auch von geringer praktischer Relevanz sein, da sich der geringstmögliche Abstand der Phasenleiter durch die Abführung der Verlustwärme ergibt bzw. im Falle der dichten Dreiecksverlegung nicht weiter zu verringern ist und ein Netzbetreiber bereits aus wirtschaftlichen Überlegungen keine unnötig großen Abstände vorsehen wird.

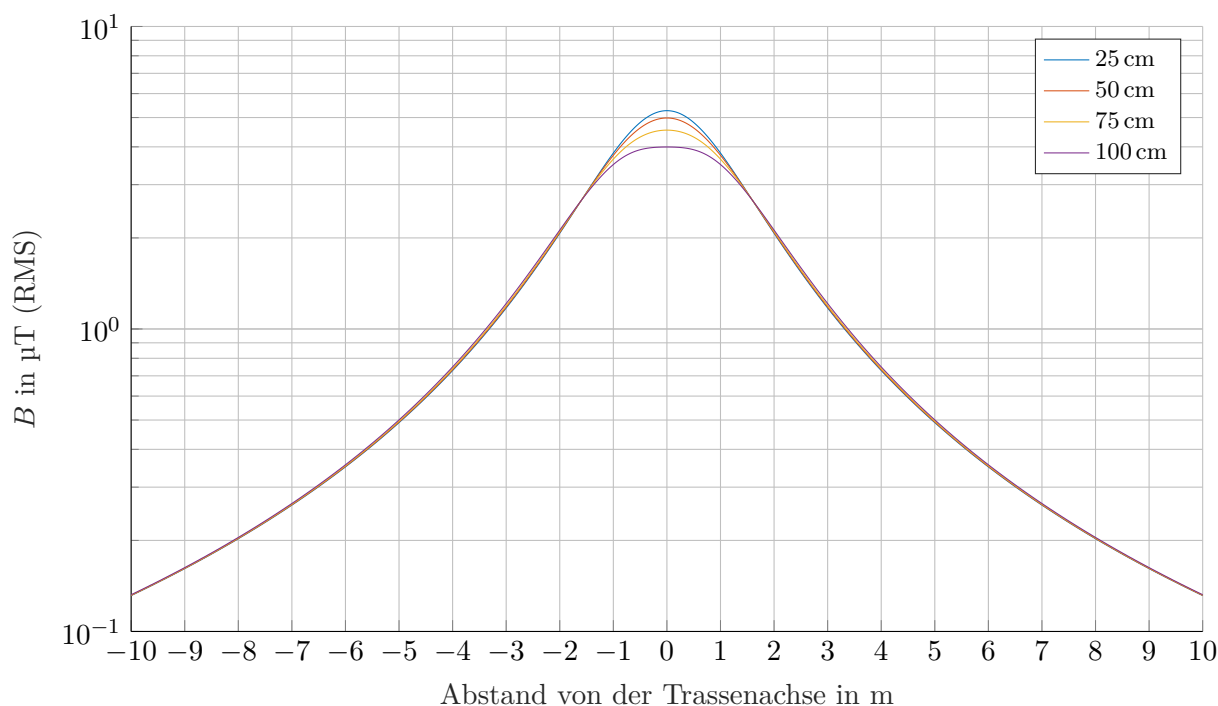


Abbildung 3.100: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 630D55-2 mit Phasenordnung 123/123

3.2.3.2 Minimieren des System-Achsabstands

Dieselben Überlegungen gelten grundsätzlich auch für den System-Achsabstand. Gleichwohl soll die Wirksamkeit dieser Minimierungsmaßnahme gesondert betrachtet werden. Wie bereits im vorherigen Abschnitt wird dabei auf die Mittelspannungskabel mit 240 mm^2 Querschnitt verzichtet und nur solche mit 630 mm^2 Querschnitt betrachtet. Da die Hochspannungskabel in Einebene-Verlegung und bei Anordnung im dichten Dreieck (1000D96), wie in Abschnitt 3.2.1 zu sehen, hinsichtlich ihres Flussdichtequerschnitts eine große Ähnlichkeit zu den entsprechenden Mittelspannungstypen aufweisen, wird aufseiten der Hochspannungskabel nur die Dreieck-Verlegung mit erhöhten Phasenleiter-Achsabständen (1000D160) berücksichtigt. Bei den Mittelspannungskabeln in Dreieckverlegung wird der System-Achsabstand von 25 auf 50, 75 und 100 cm erhöht; im Falle der Einebenen-Verlegung werden zusätzlich zum standardmäßig angenommenen System-Achsabstand von 45 cm die Werte 100, 150 und 200 cm betrachtet. Bei den Hochspannungskabeln werden neben dem üblichen Achsabstand von 100 cm die Abstände 50, 150, 200 und 300 cm untersucht. In der Praxis können solche gegenüber der Standardbauweise erhöhten System-Achsabstände bei besonderen Verlegearten von Kabeln vorkommen, beispielsweise beim Einsatz eines Kabelpflugs oder bei der Nutzung von Spülbohrungen. Da neben dem Phasen- und System-Achsabstand auch die Phasenbelegung der Kabel entscheidende Bedeutung für das Zusammenwirken der einzelnen Flussdichtekomponenten hat, werden für jede zweisystemige Kabelgeometrie alle möglichen Phasenordnungen bei gleichsinnig positivem Stromfluss berücksichtigt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 3.100 bis 3.117 dargestellt.

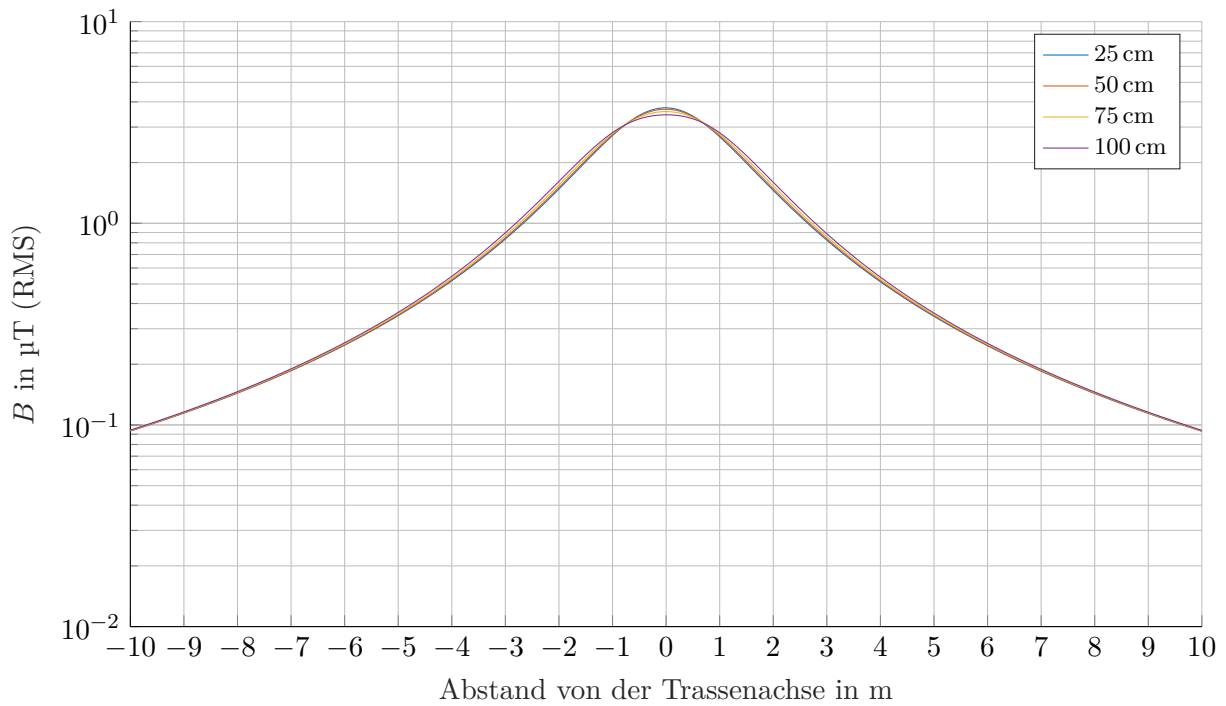


Abbildung 3.101: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 630D55-2 mit Phasenordnung 123/132

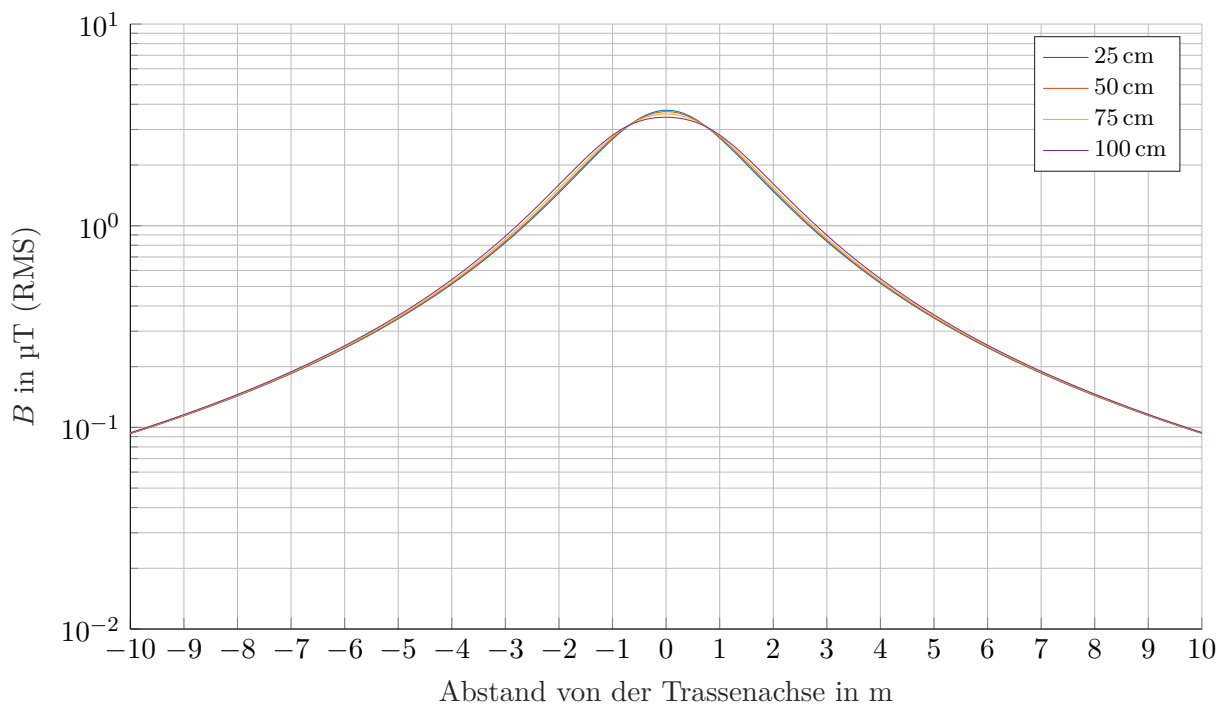


Abbildung 3.102: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 630D55-2 mit Phasenordnung 123/213

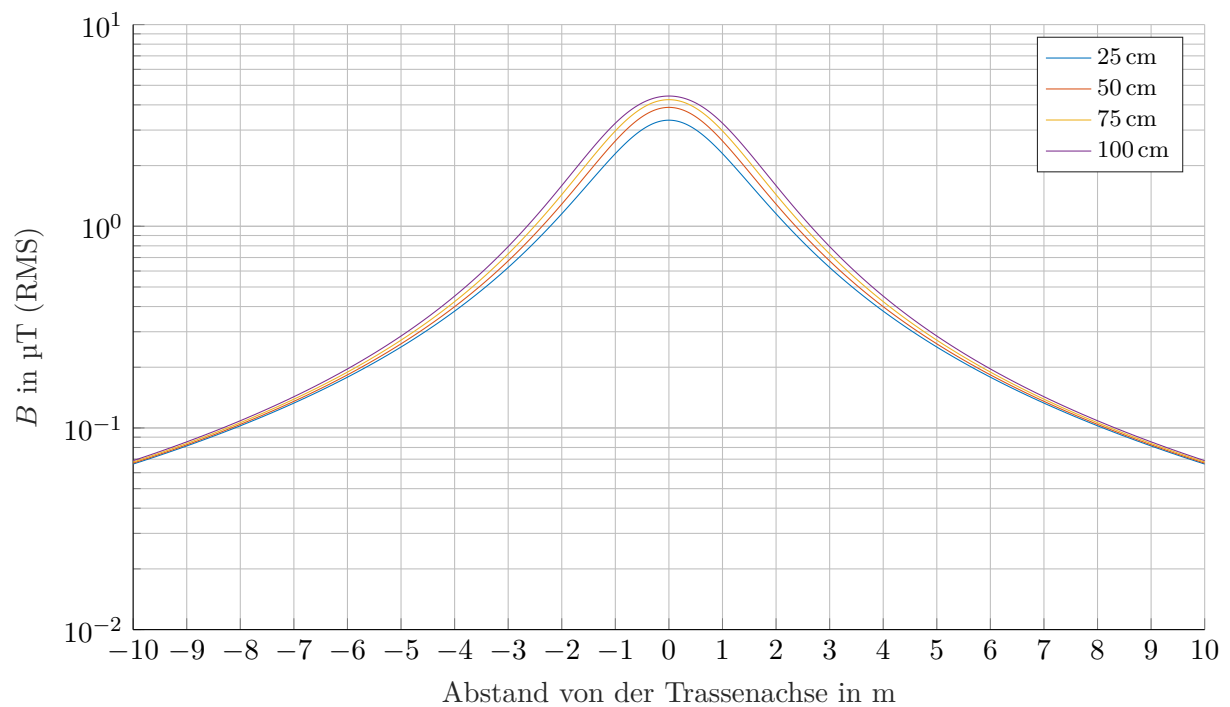


Abbildung 3.103: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsenabstand beim Typ 630D55-2 mit Phasenordnung 123/231

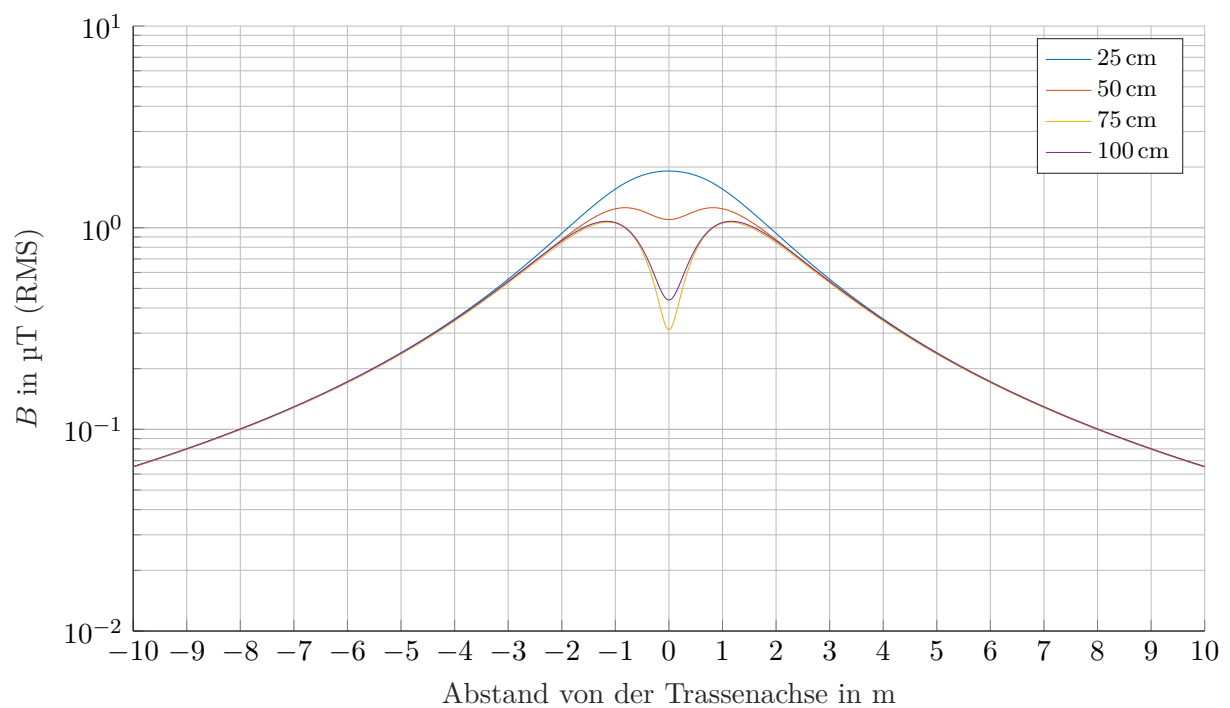


Abbildung 3.104: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsenabstand beim Typ 630D55-2 mit Phasenordnung 123/312

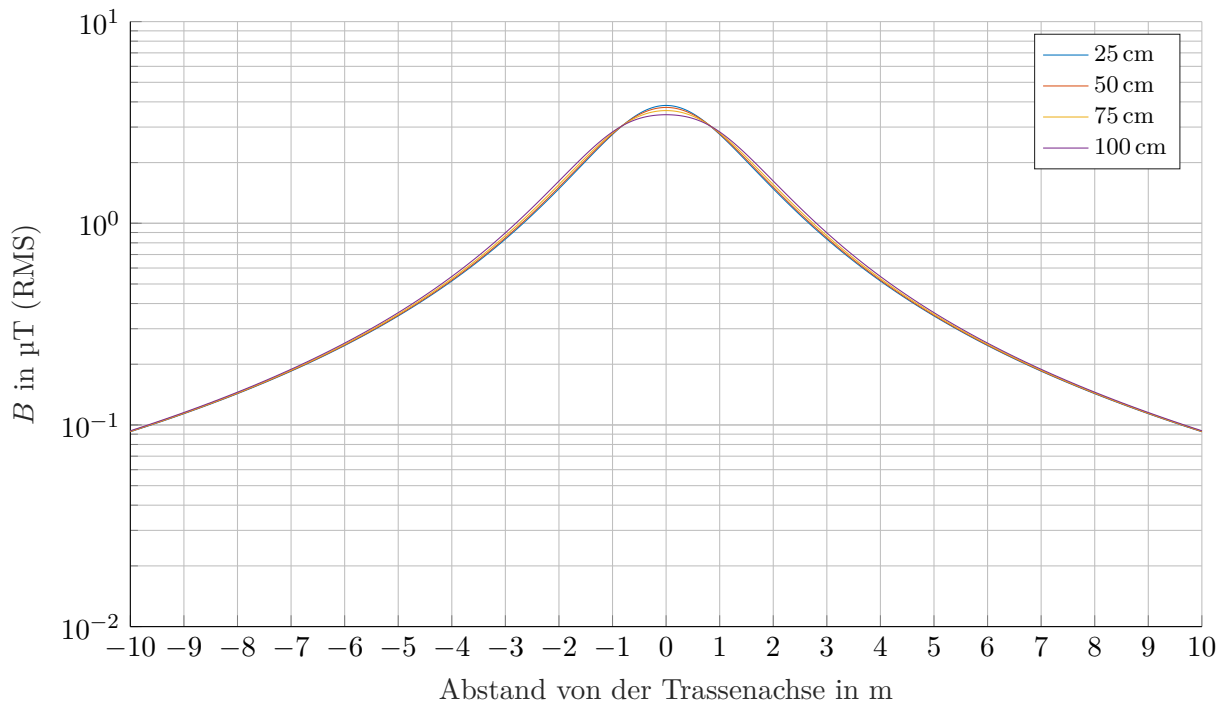


Abbildung 3.105: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsenabstand beim Typ 630D55-2 mit Phasenordnung 123/321

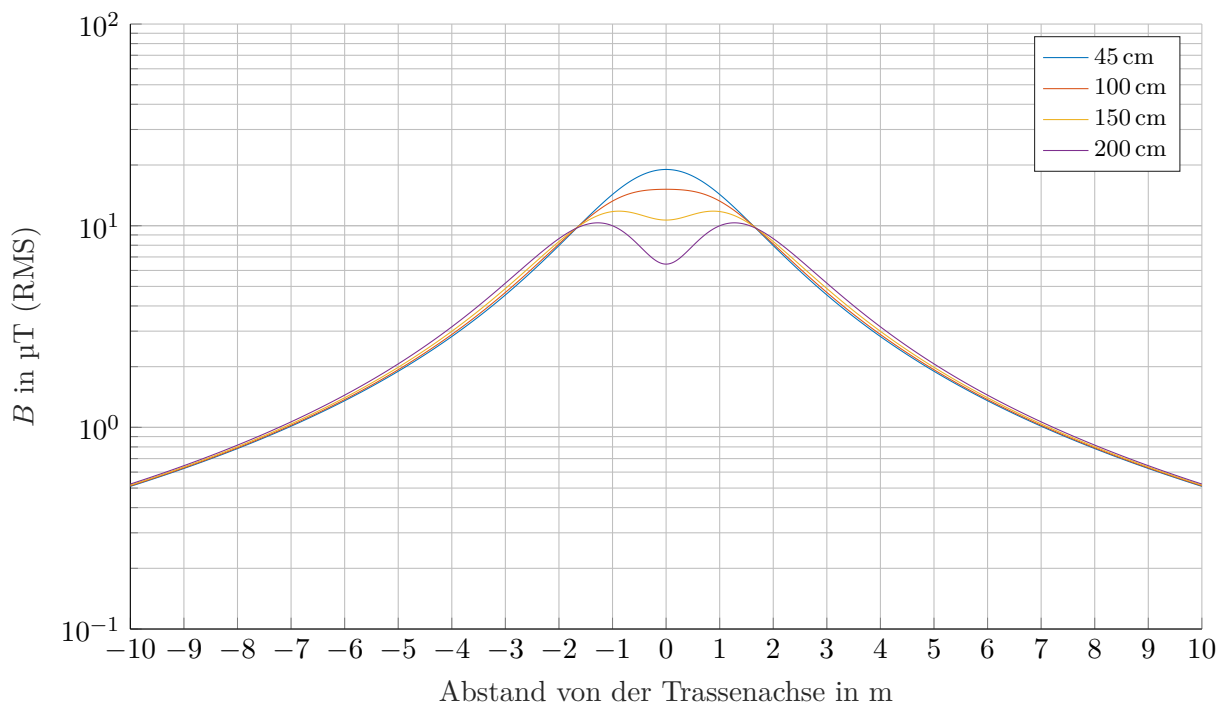


Abbildung 3.106: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsenabstand beim Typ 630E150-2 mit Phasenordnung 123/123

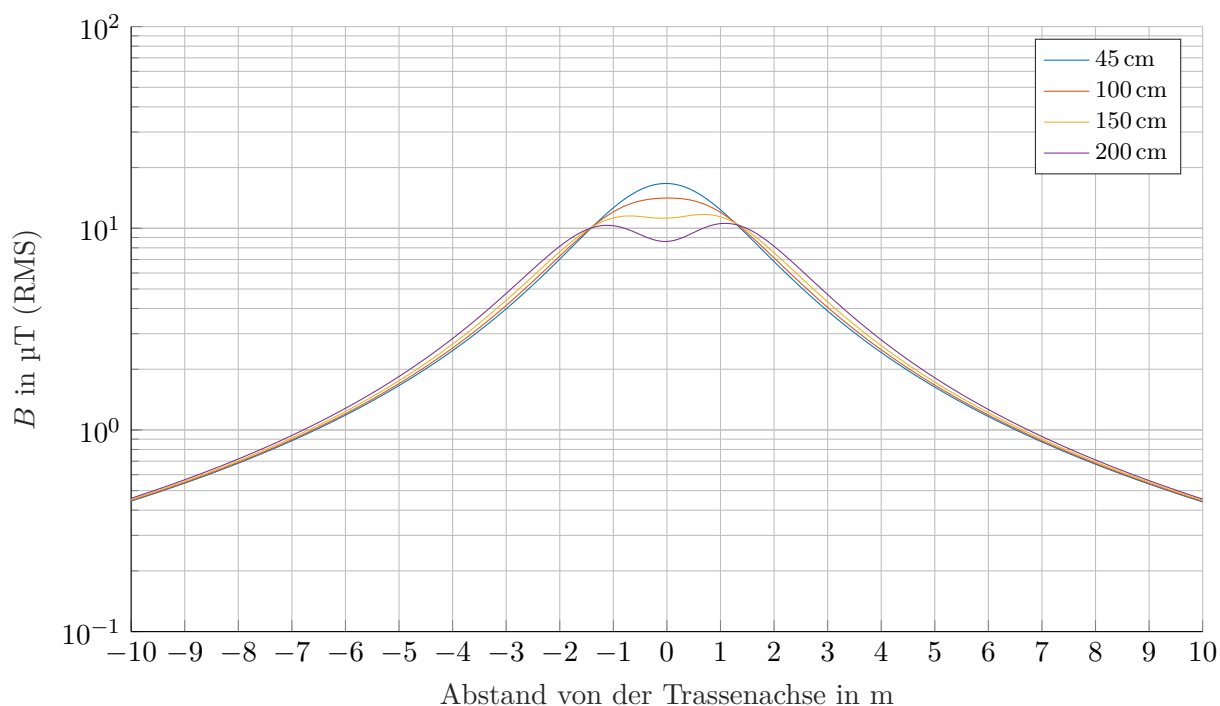


Abbildung 3.107: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsenabstand beim Typ 630E150-2 mit Phasenanzordnung 123/132

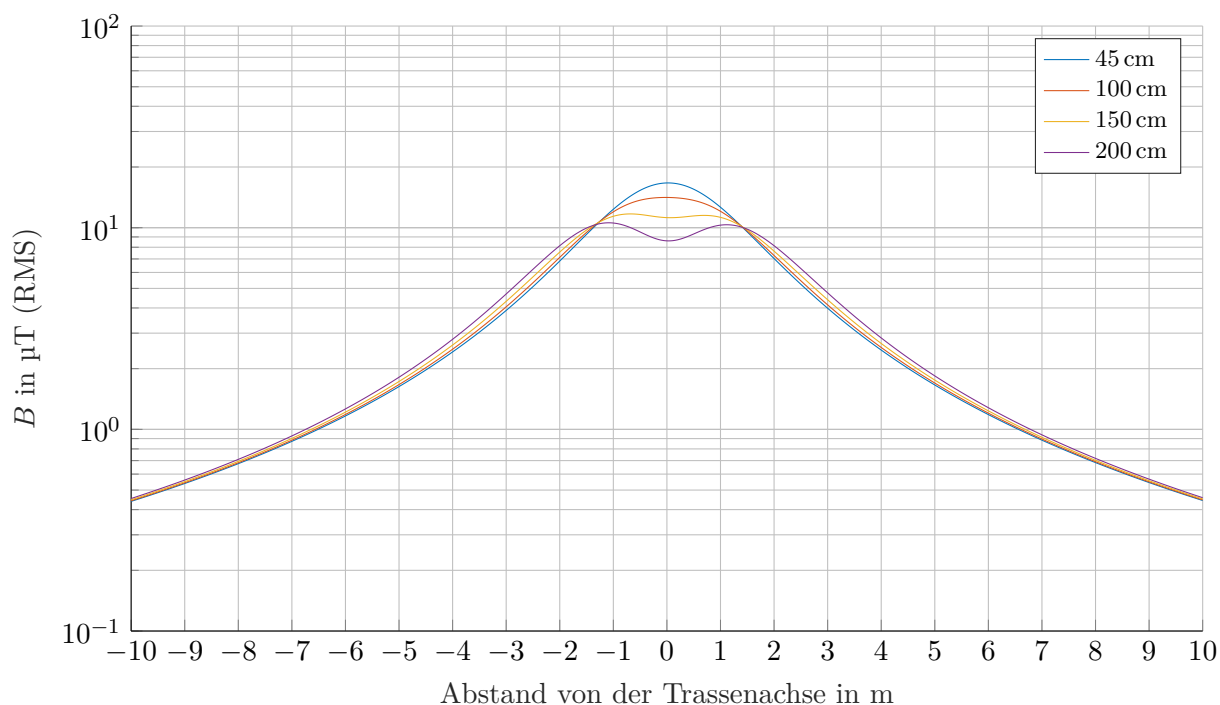


Abbildung 3.108: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsenabstand beim Typ 630E150-2 mit Phasenanzordnung 123/213

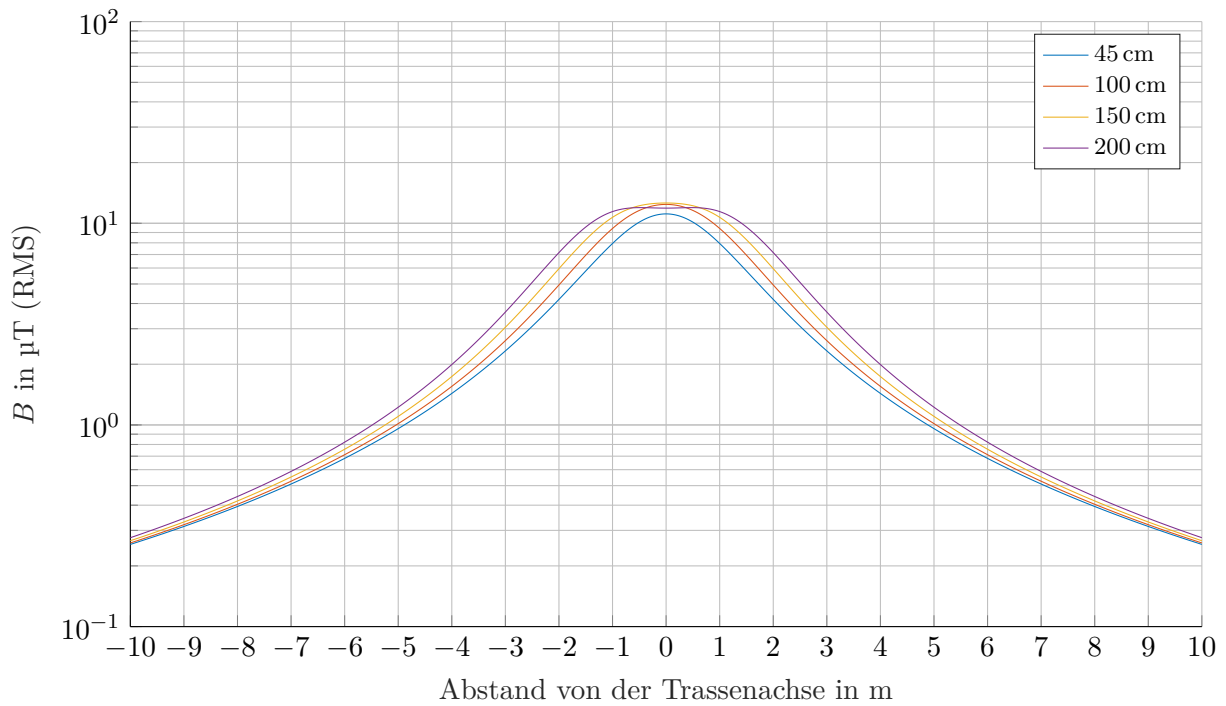


Abbildung 3.109: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 630E150-2 mit Phasenordnung 123/231

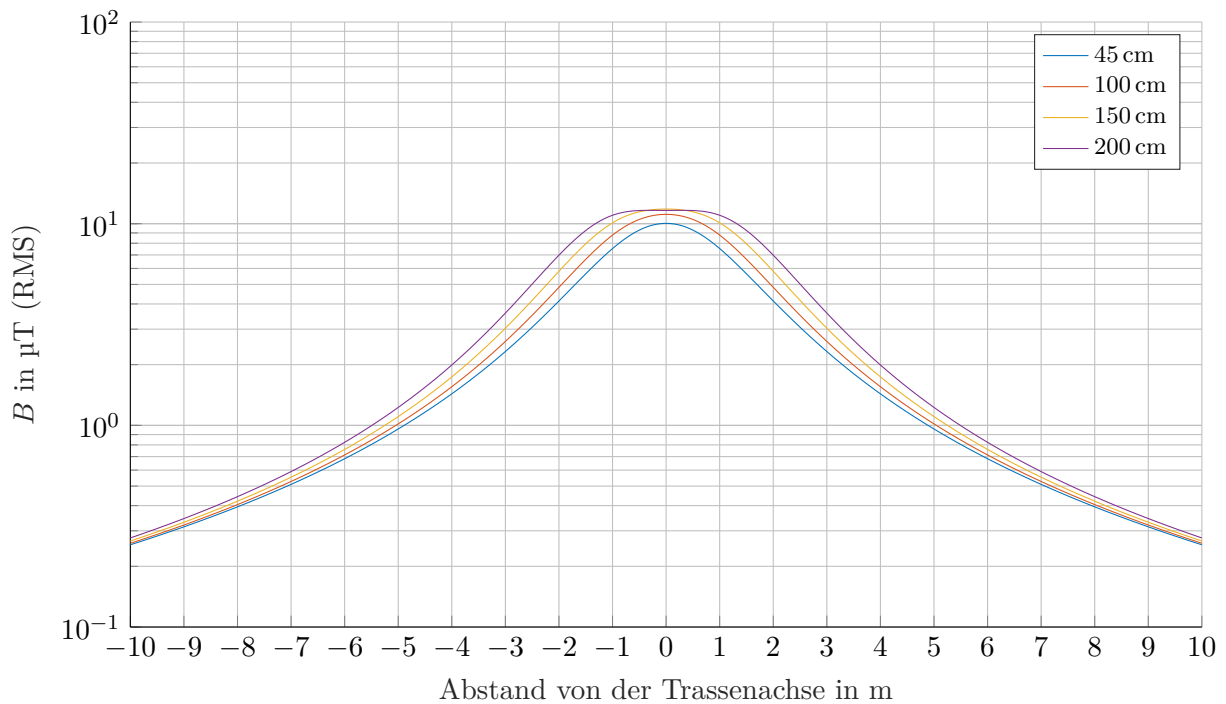


Abbildung 3.110: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 630E150-2 mit Phasenordnung 123/312

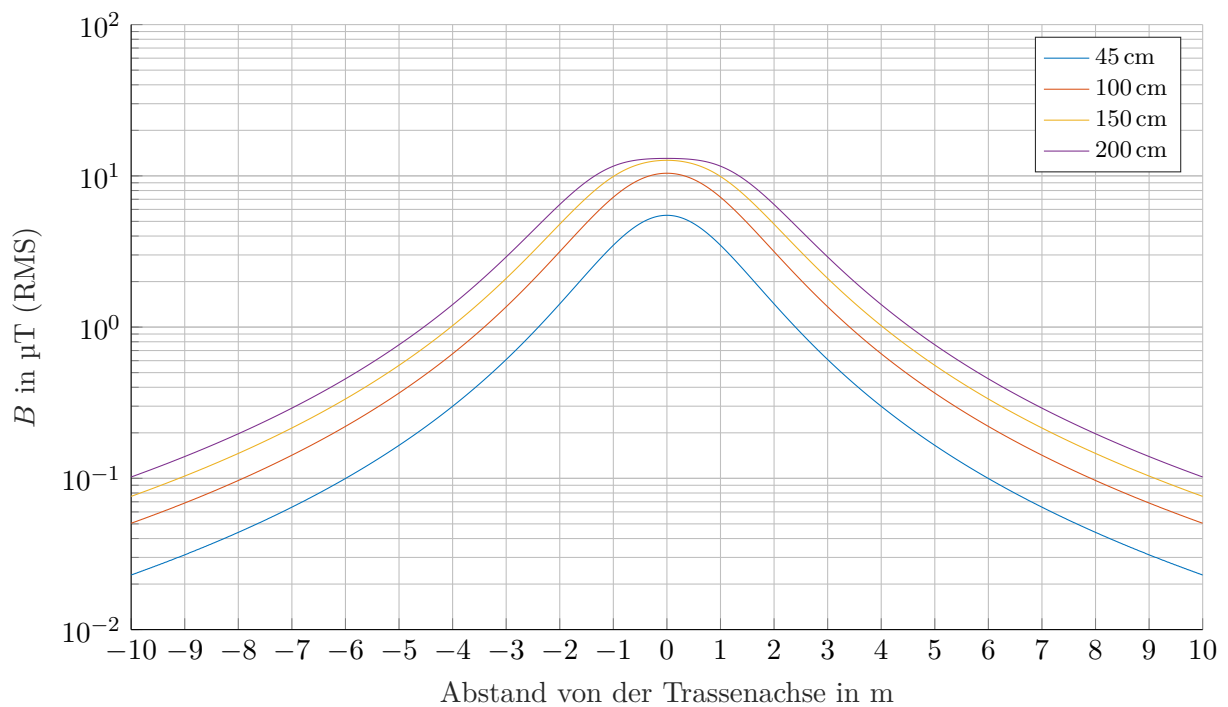


Abbildung 3.111: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsenabstand beim Typ 630E150-2 mit Phasenordnung 123/321

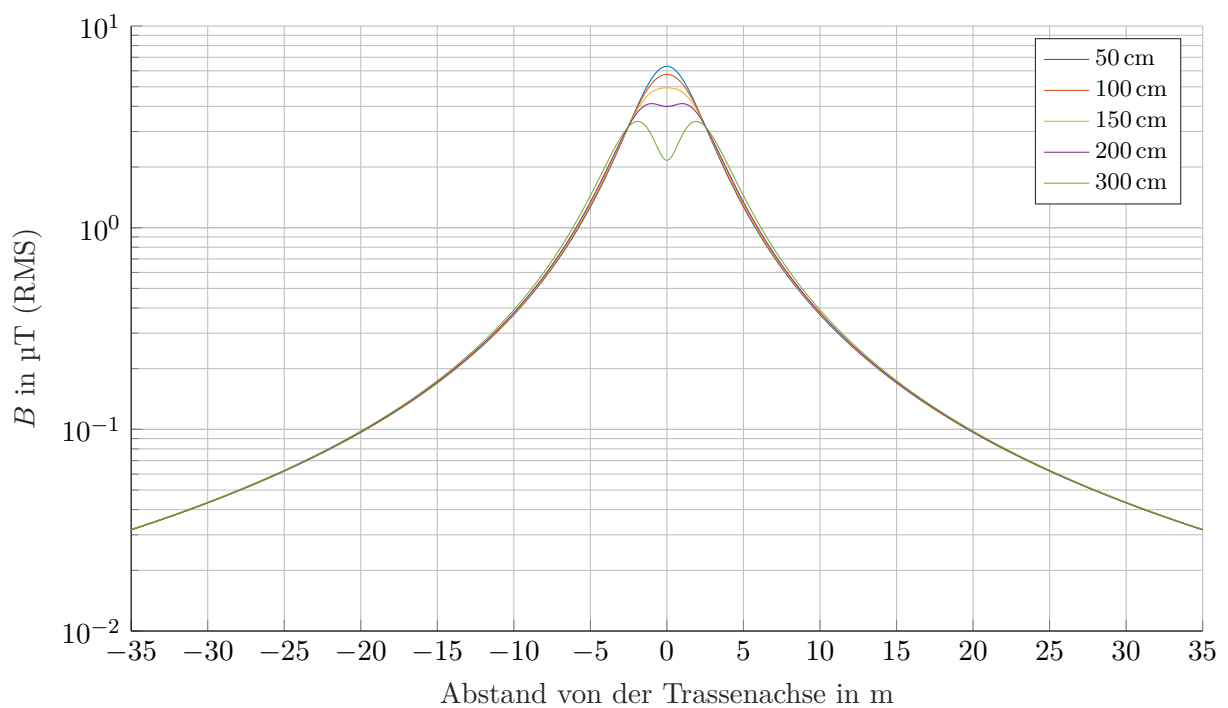


Abbildung 3.112: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsenabstand beim Typ 1000D160-2 mit Phasenordnung 123/123

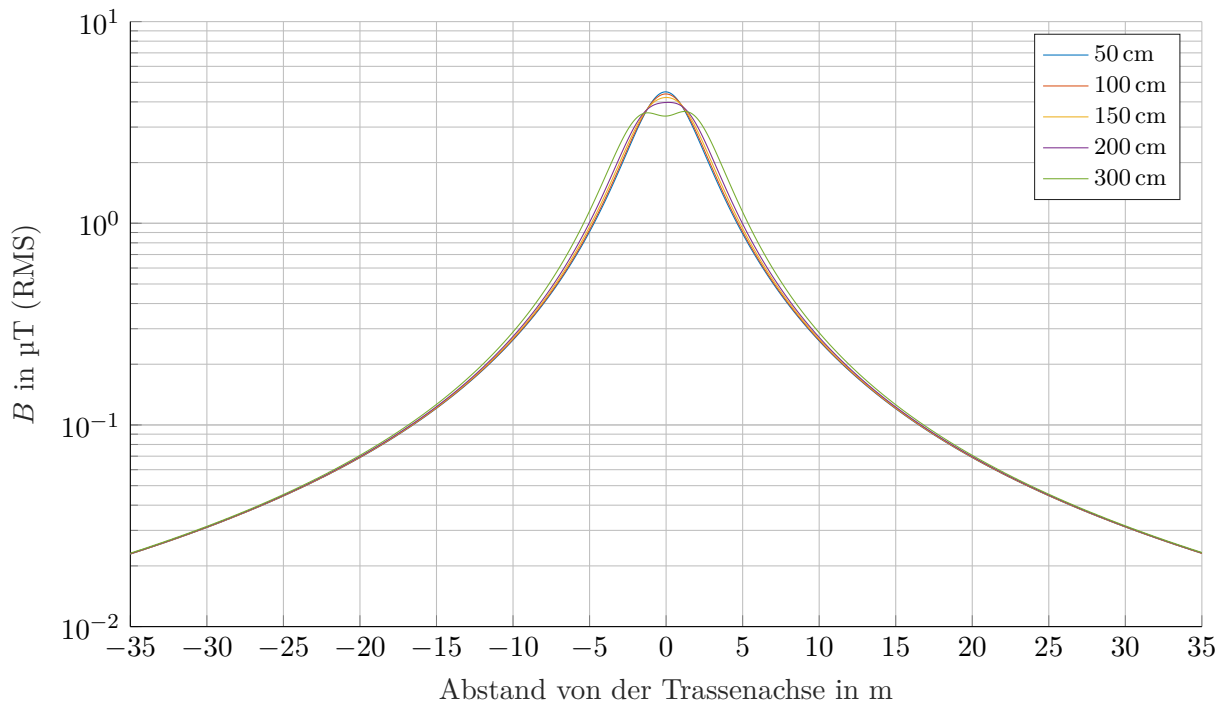


Abbildung 3.113: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsenabstand beim Typ 1000D160-2 mit Phasenanzordnung 123/132

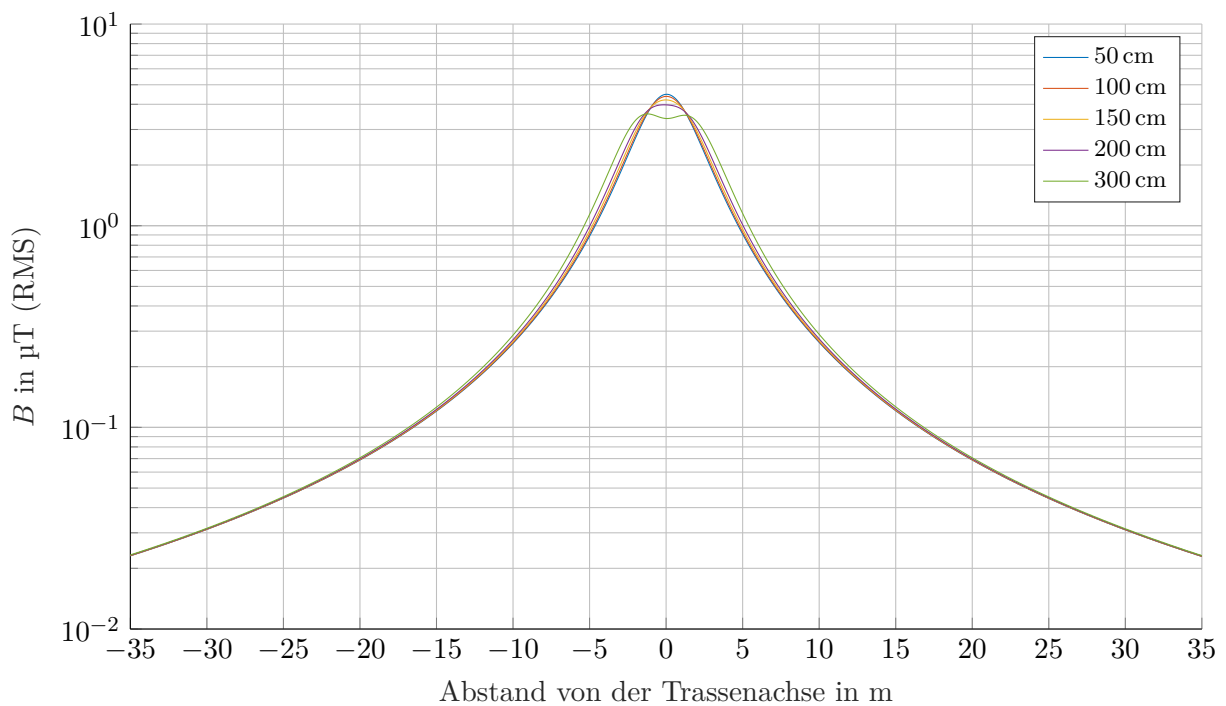


Abbildung 3.114: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsenabstand beim Typ 1000D160-2 mit Phasenanzordnung 123/213

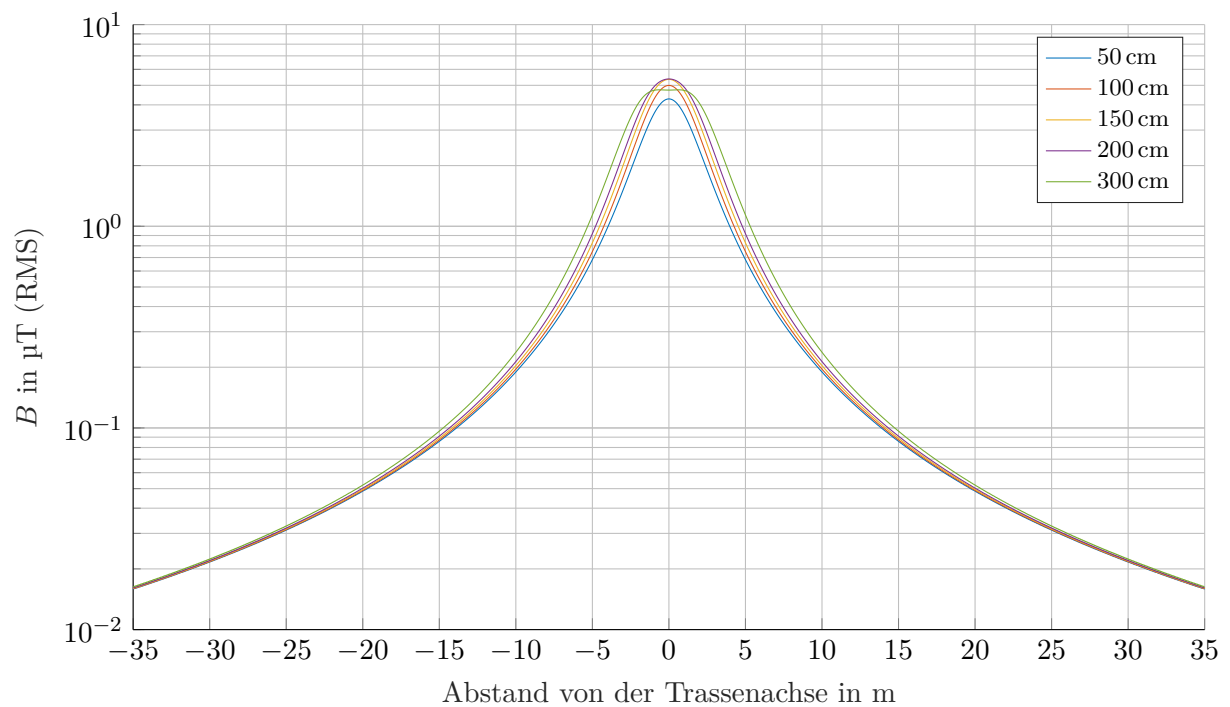


Abbildung 3.115: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsenabstand beim Typ 1000D160-2 mit Phasenordnung 123/31

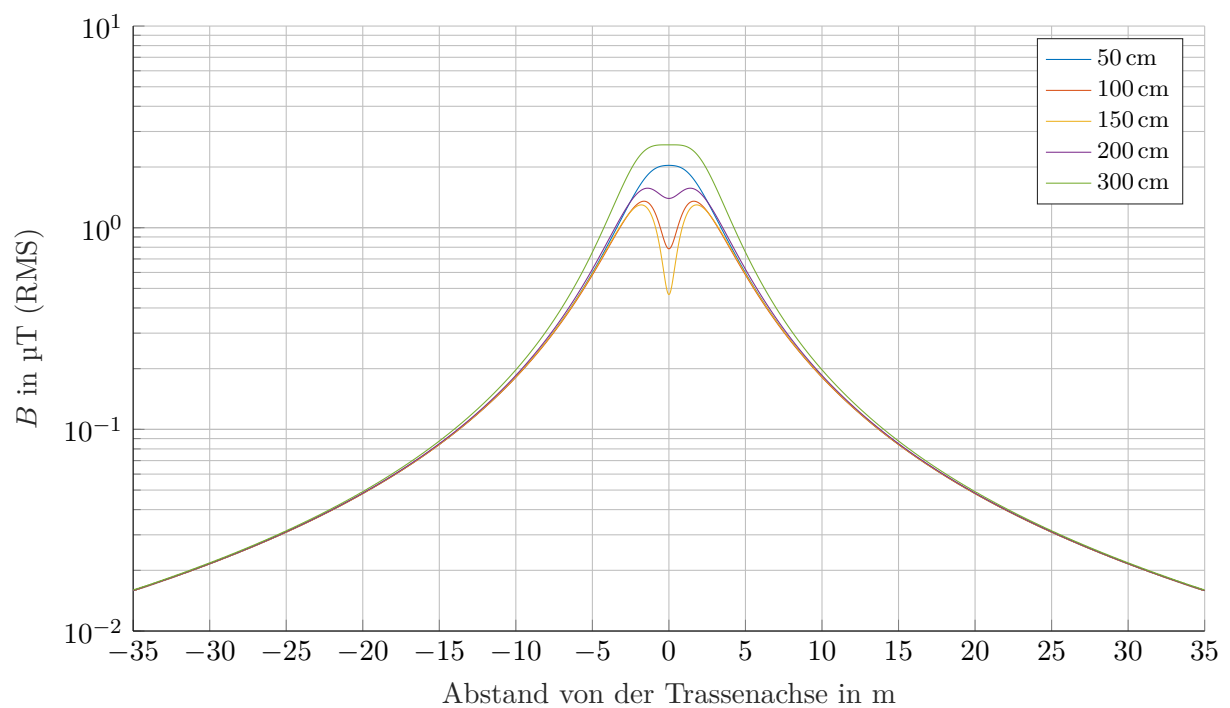


Abbildung 3.116: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsenabstand beim Typ 1000D160-2 mit Phasenordnung 123/312

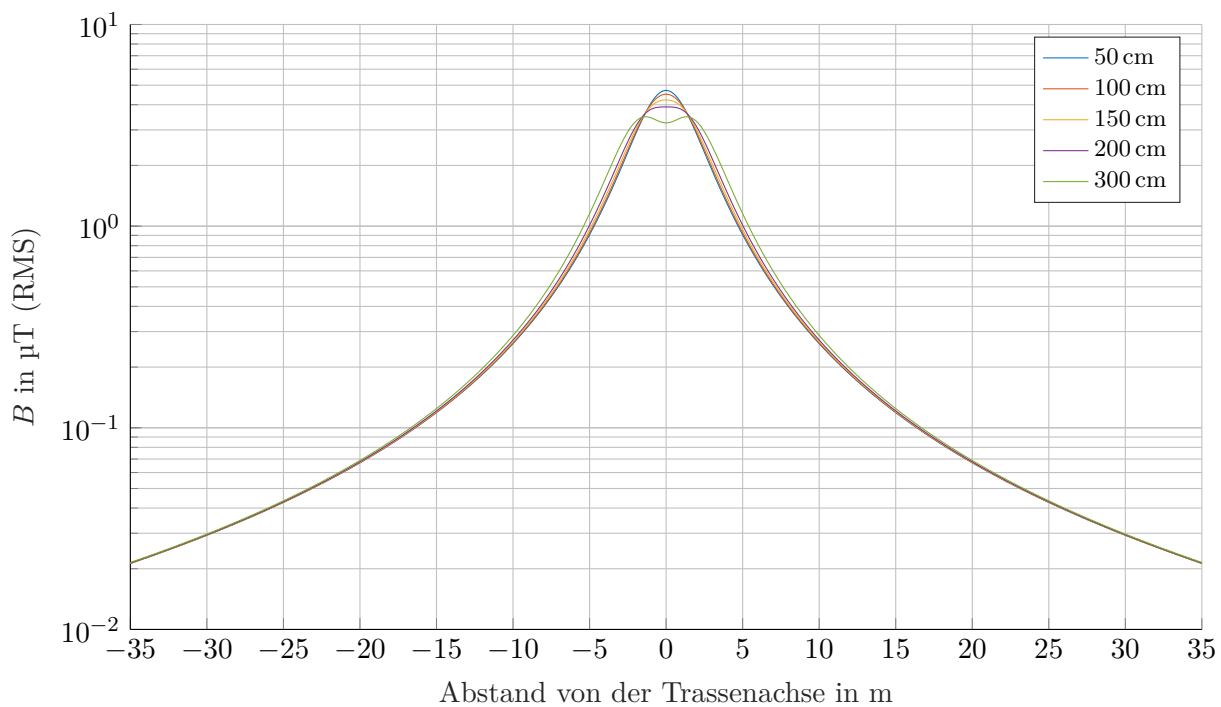


Abbildung 3.117: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsenabstand beim Typ 1000D160-2 mit Phasenordnung 123/321

3.2.3.3 Ergebnisse zur Minimierung des System-Achsenabstands

Es zeigt sich ein uneinheitliches Bild:

- Im Falle der **Dreieck-Anordnungen** sorgt nur bei der Phasenbelegung 123 / 231 ein vergrößerter System-Achsenabstand für höhere Flussdichtewerte im gesamten Einwirkungsbereich. Im Falle der Hochspannungskabel stellt dabei der System-Achsenabstand 300 cm eine Ausnahme dar. Demgegenüber ist bei der Phasenordnung 123 / 123 ein größerer System-Achsenabstand eindeutig mit einer niedrigeren Flussdichte verbunden, wobei dieser Effekt nur in besonderer Nähe zur Trassenachse beobachtbar ist. Im Falle der Phasenordnung 123 / 312 zeigt sich ein uneinheitliches Bild, wobei der geringste betrachtete System-Achsenabstand die höchsten (Mittelspannung) bzw. zweithöchsten (Hochspannung) Flussdichtewerte hervorruft. Bei den übrigen Phasenordnungen ergibt sich in Abhängigkeit von der Entfernung zur Trassenachse teilweise eine Verringerung und teilweise eine Erhöhung der Flussdichtewerte mit einer Erhöhung des System-Achsenabstands, wobei diese Unterschiede in allen Fällen nur gering sind.
- Auch bei der **Einebene-Anordnung** gibt es eine Phasenordnung, bei der ein größerer System-Achsenabstand überall zu höheren Flussdichtewerten führt. Dies ist die Anordnung 123 / 321. Mit einer Einschränkung für den größten betrachteten System-Achsenabstand gilt dies auch für die Anordnungen 123 / 231 und 123 / 312. Bei den übrigen Phasenordnungen gibt es einen Abstand von etwa 1,5 m beiderseits von der Trassenachse, innerhalb dessen ein größerer System-Achsenabstand zu geringeren und außerhalb dessen ein größerer System-Achsenabstand zu

höheren Flussdichtewerten führt, wobei der letztere Zusammenhang nur schwach ausgeprägt ist.

3.2.3.4 Bewertung

Es gibt damit sowohl bei Einebene- als auch bei Dreieck-Verlegung nur jeweils eine Phasenanzordnung, bei der, mit einer einzigen Ausnahme bei den Hochspannungskabeln, im gesamten Einwirkungsbereich ein vergrößerter System-Achsabstand stets zu einer Erhöhung der Flussdichtewerte führt. Demgegenüber existiert bei der Dreieck-Anordnung eine Phasenbelegung mit entgegengerichtetem Zusammenhang zwischen System-Achsabstand und Flussdichte. In den übrigen Fällen ist entweder kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Flussdichte und System-Achsabstand erkennbar oder ein größerer System-Achsabstand führt in Teilen des Einwirkungsbereiches zu höheren und in anderen Teilen zu einer niedrigeren Flussdichte. Dies steht im Widerspruch zur von der 26. BImSchVVwV postulierten hohen Wirksamkeit dieser Minimierungsmaßnahme. Es ist anzumerken, dass bei der in Abschnitt 3.2.1.1 für Einebene-Geometrien mit gleichsinnigem Stromfluss als optimal erkannten Phasenanzordnung 123 / 321 ein geringerer System-Achsabstand zu niedrigeren Flussdichtewerten führt, während die für Dreieck-Geometrien mit gleichsinnigem Stromfluss als optimal ermittelte Phasenanzordnung 123 / 312 diesbezüglich keine Abhängigkeit zeigt.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Methode der Feldminimierung durch Verringerung der Kabelabstände im Falle der Phasenleiter-Achsabstände grundsätzlich wirksam ist, während dies in Bezug auf den System-Achsabstand nur für jeweils eine einzige Phasenanzordnung gilt. Gleichwohl ist die praktische Bedeutung beider Maßnahmen als gering einzuschätzen: Der minimale Phasenleiter-Achsabstand ist durch die notwendige Wärmeabfuhr der Kabel bestimmt; dasselbe gilt für den System-Achsabstand, wobei dieser auch durch die Verlegungsmethode vorgegeben sein kann. Gleichzeitig sind technisch nicht gerechtfertigte, größere Phasenleiter- und System-Achsabstände mit höheren Baukosten verbunden, sodass ein Netzbetreiber bereits aus wirtschaftlichen Gründen die geringstmöglichen Abstände wählen wird.

3.2.4 Optimieren der Verlegegeometrie

Die 26. BImSchVVwV schreibt dazu in ihrem Abschnitt 5.3.2.3:

„Kabel werden so verlegt, dass die relative Position der einzelnen Kabel eine bestmögliche Kompensation der entstehenden magnetischen Felder ermöglicht. Sie können in einer Ebene – horizontal oder vertikal – oder im Dreieck verlegt werden. Für die Kompensation ist eine Anordnung im Dreieck günstig. Zusätzlich können Kabel mit kleinerem Kabelquerschnitt verdreht werden.“

Voraussetzungen: Die Optimierung der Verlegegeometrie ist vor allem bei Einleiterkabeln möglich. Bei Neubau kann die optimale Verlegegeometrie festgelegt werden; bei wesentlicher Änderung kann die Wahl einer alternativen Verlegegeometrie an technische Grenzen stoßen. Die Anforderungen an die Wärmeableitung können eine Flachverlegung der Kabel erfordern.

Wirksamkeit: Durch die Wahl einer günstigen Verlegegeometrie kann die Immission im Einwirkungsbereich deutlich gegenüber einer ungünstigen Geometrie verringert werden. Die Wirksamkeit der Maßnahme ist deshalb als hoch einzuschätzen. Sie wird allerdings von anderen Anlagenparame-

tern, wie z. B. bei nicht verdrehten Kabeln vom Leiterabstand beeinflusst. Die Verdrehung trägt in Abhängigkeit von der Schlaglänge zur Minimierung bei.

Hinweise: Übereinander verlegte oder verdrehte Kabel können besonderen Aufwand bei der Entstörung erfordern. Außerdem ist der Abstand der Erdkabel zueinander vom Wärmeableitvermögen des umgebenden Erdreichs oder des Ersatzfüllguts abhängig. Der zusätzliche Aufwand für eine spezielle Verlegegeometrie kann schon bei einem Neubau erheblich sein. Bei wesentlicher Änderung wird die Wahl einer günstigeren Geometrie in Abhängigkeit von der Spannungsebene oft an technische Grenzen stoßen“.

Beim Blick in Abschnitt 3.2.1 ist zu erkennen, dass die Dreieck-Anordnungen desselben Querschnitts über den gesamten Einwirkungsbereich eine geringere magnetische Flussdichte aufweisen als die entsprechenden Einebene-Anordnungen. Entsprechendes gilt für die einsystemigen Dreieck- und Einebene-Anordnungen in Abschnitt 3.2.2. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Einebene-Anordnungen einen größeren Phasenleiter-Achsabstand und folglich eine bessere Wärmeableitung und höhere Belastbarkeit aufweisen als die Dreieck-Anordnungen. Eine Einebene-Anordnung kann daher nicht ohne Abstriche an der Übertragungsleistung durch eine Dreieck-Anordnung ersetzt werden. Gleichzeitig bringt eine Dreieck-Anordnung eine geringere Grabenbreite und damit niedrigere Baukosten mit sich als die Einebene-Anordnung, sodass ein Netzbetreiber bereits aus wirtschaftlichen Gründen, sofern technisch möglich, die Dreieck-Anordnung wählen wird. Die Verlegung von Phasenleitern in einer Ebene übereinander soll nicht weiter betrachtet werden, da anzunehmen ist, dass sie aufgrund der größeren Phasenleiter-Achsabstände eine schlechtere Feldkompensationswirkung aufweist als die Dreieck-Anordnung, zugleich aber keinen Vorteil hinsichtlich der Wärmeableitung bietet, ihre Verlegung durch das notwendige Übereinanderhalten technisch anspruchsvoll ist und sie eine Entstörung bzw. Wartung der unten liegenden Phasenleiter erschwert.

3.2.4.1 Verdrehung

Eine Verdrehung von Mittelspannungskabeln ist in Deutschland allgemein unüblich. Gleichwohl soll ihre Wirkung auf den Querschnitt der magnetischen Flussdichte untersucht werden. Da eine Verdrehung mit steigendem Kabelquerschnitt immer schwieriger und aufwendiger wird, soll dafür das Mittelspannungskabel mit 240 mm^2 Querschnitt in Dreieck-Anordnung mit einem System betrachtet werden, wobei im Falle der Verdrehung Schlaglängen von 2 bzw. 4 m angenommen werden. Die Schlaglänge bezeichnet denjenigen Abstand in der Trassenachse, innerhalb dessen sich das Dreierbündel einmal um die eigene Achse gedreht hat und folglich die einzelnen Phasenleiter wieder dieselbe Lage erreicht haben.

In Abbildung 3.118 ist zu erkennen, dass die Verdrehung insbesondere in größerem Abstand von der Trassenachse eine deutliche Verringerung der magnetischen Flussdichte mit sich bringt. Dem gegenüber stehen höhere Kosten bei der Verlegung, insbesondere aber ein größerer Aufwand bei der Entstörung und damit eine Verringerung der Versorgungssicherheit. Der zusätzliche Aufwand für die Verdrehung bei der Verlegung ließe sich vermeiden, indem das Kabel bereits vom Hersteller verdreht geliefert wird. Verglichen mit der ansonsten üblichen einzelnen Anlieferung würde sich bei der Lieferung dreier verdrehter Phasenleiter die mögliche Lieferlänge bei unverändertem höchstzulässigem Transportgewicht auf $1/3$ verringern, weswegen eine entsprechend höhere Zahl

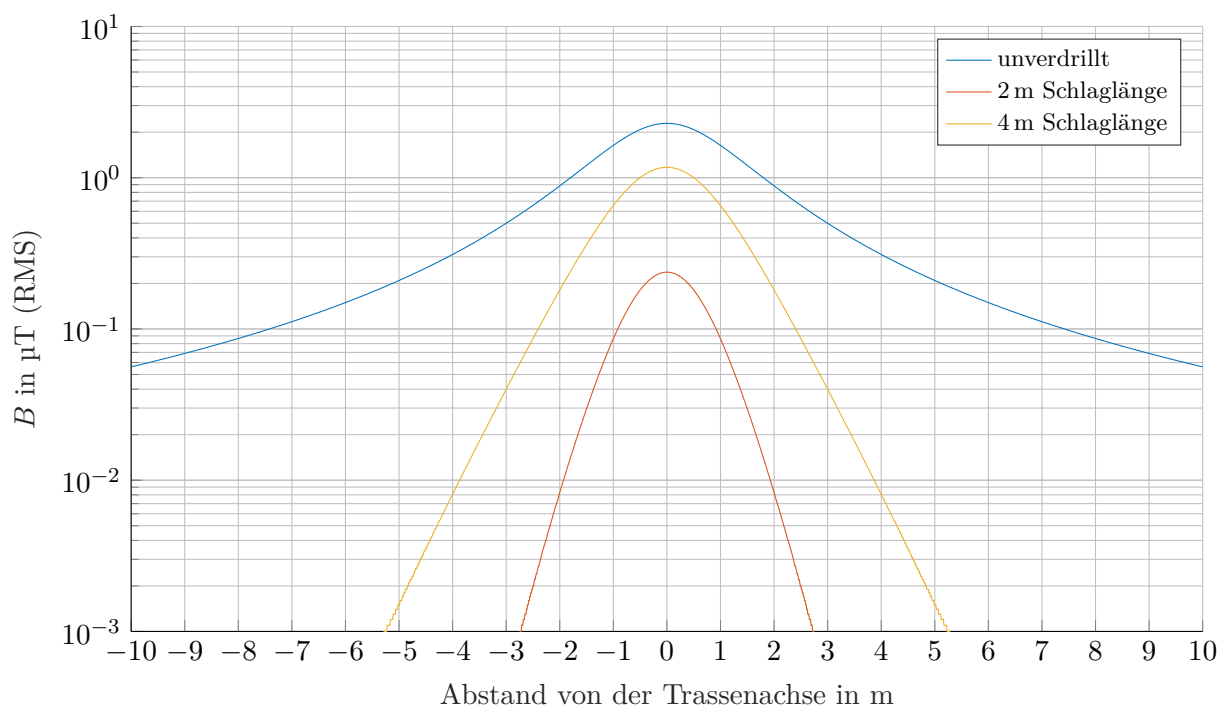


Abbildung 3.118: Magnetische Flussdichte beim Typ 240D47-1 in Abhängigkeit von der Verdrillung

an Verbindungsmuffen eingesetzt werden müsste. Dies wiederum wäre mit zusätzlichem Aufwand bei der Verlegung und unter Umständen mit einer Verringerung der Zuverlässigkeit des Kabels verbunden.

Ferner ist zu berücksichtigen, dass bei verdrehten Kabeln eine Biegekräft auf die Muffen einwirkt, was Fragen hinsichtlich deren Haltbarkeit aufwirft und folglich ebenfalls nachteilige Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit haben könnte. Schließlich kann die Verdrillung nur bei Mittelspannungskabeln mit niedrigem Querschnitt angewendet werden, die ohnehin bereits geringe absolute Flussdichtewerte hervorrufen – im obigen Beispiel weniger als $3\text{ }\mu\text{T}$ direkt über der Trassenachse. Die Verhältnismäßigkeit dieser Minimierungsmaßnahme steht damit in Frage.

3.2.5 Schlussfolgerungen

Im Rahmen der vorstehenden Abschnitte wurden folgende Erkenntnisse über die von der 26. BIm-SchVVwV für Erdkabel vorgesehenen Minimierungsmaßnahmen gewonnen. Da bei Erdkabeln nur die magnetische Flussdichte von Bedeutung ist, werden in der nachfolgenden Aufzählung die Begriffe „Feldverringern“ und „Feldminimierung“ bedeutungsgleich für diese verwendet.

- Die Feldminimierung durch Optimieren der Leiteranordnung ist wirksam und verursacht keine zusätzlichen Kosten, allerdings stellt die für gleichsinnige Lastflussrichtung optimierte Phasenbelegung bei einer teilweisen Umkehr des Lastflusses die ungünstigste Option dar. Diese Minimierungsmaßnahme scheidet daher überall dort aus, wo keine vorherrschende Lastflussrichtung (mehr) gegeben ist.

- Die Optimierung der Verlegetiefe, also die Tieferlegung von Kabeln, ist zumindest im Nahbereich um die Trassenachse herum wirksam. Jedoch ist aus Gründen der Spartenkonvention eine Tieferlegung in bewohnten Gebieten kaum ohne Abstriche an der Wartbarkeit und damit an der Zuverlässigkeit der Kabel möglich; zudem stehen teilweise deutlich höhere Kosten im Raum.
- Die Feldminimierung durch Verringerung der Kabelabstände ist wirksam, solange es um die Phasenleiter-Achsabstände geht. Im Falle des System-Achsabstands ist bei einigen Phasenbelegungen eine Feldverringerng, bei anderen Phasenbelegungen aber, anders als von der 26. BImSchVVwV postuliert, eine Felderhöhung die Folge der Abstandsverringerng. Unabhängig davon führen geringere Phasenleiter- und System-Achsabstände zu einer schlechteren Wärmeabfuhr und damit zu einer geringeren Strombelastbarkeit.
- Die Optimierung der Verlegegeometrie, beispielsweise durch den Ersatz einer Einebene- durch eine Dreieck-Verlegung, bringt zwar eine Feldminimierung, aber auch eine Verringerung der Strombelastbarkeit mit sich. Auch durch die Verdrillung von Kabeln ist eine Feldverringerng erzielbar, allerdings um den Preis höherer Kosten und einer geringeren Versorgungssicherheit.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass eine Feldverringerng bei Erdkabeln nur um den Preis einer verringerten Versorgungszuverlässigkeit und/oder Strombelastbarkeit möglich ist; zudem entstehen oftmals höhere Kosten. Lediglich die Optimierung der Leiteranordnung ist ohne nachteilige technische Auswirkungen ausführbar, beschränkt sich allerdings in Zeiten der Energiewende auf (groß)städtische Gebiete und auf die in Ausnahmefällen vorkommenden parallel geschalteten Kabelsysteme.

3.3 Ortsnetzumspannstationen

Bei Ortsnetzstationen kann grob zwischen Gebäude- und Einbaustationen unterschieden werden. Während bei Gebäudestationen alle Betriebsmittel der Ortsnetzstation innerhalb eines eigenen Baukörpers untergebracht sind, befinden sich Einbaustationen in einem oder mehreren Räumen innerhalb eines anderen Gebäudes. Im Allgemeinen bevorzugen Netzbetreiber, sofern räumlich möglich, die Errichtung von Gebäudestationen, da bei diesen keine Abstimmung mit einem fremden Gebäudeeigentümer notwendig ist. Bei beengten räumlichen Verhältnissen, wie sie oft in innerstädtischen Lagen vorkommen, ist allerdings meist nur die Errichtung von Einbaustationen möglich. Beiden Arten von Stationen gemein ist, dass die Betriebsmittel allseitig durch den Baukörper umschlossen sind, sodass das elektrische Feld nicht nach außen dringen kann. Es muss lediglich die magnetische Flussdichte betrachtet werden.

Da bei der Errichtung von Einbaustationen die Gegebenheiten innerhalb des fremden Gebäudes zu beachten sind, existiert hier eine unübersehbare Typenvielfalt; es würde geradezu einen außergewöhnlichen Zufall darstellen, auf zwei identische Einbaustationen zu stoßen. Ähnlich verhielt es sich in der Vergangenheit mit Gebäudestationen, als selbige meist in Anpassung an ihre Umgebung vor Ort individuell aufgemauert wurden. Aus Rationalisierungsgründen hinsichtlich Beschaffung und Aufstellung ist man in der jüngeren Vergangenheit dazu übergegangen, Gebäudestationen in Beton-Fertigbauweise auszuführen. Es bietet sich daher an, im Rahmen dieses Abschnitts zwei solcher standardisierter Gebäudestationen im Hinblick auf die Flussdichteverhältnisse und auf die Minimierungsmöglichkeiten zu betrachten, wobei daraus auch allgemeine Schlüsse für Einbaustationen gezogen werden sollen. Die Typenbezeichnung einer Fertigstation gibt die Außenmaße des Baukörpers in Dezimetern an; eine Station vom Typ 2817 (sprich: „Achtundzwanzig-Siebzehn“) hat beispielsweise die Außenabmessungen 2,8 m x 1,7 m.

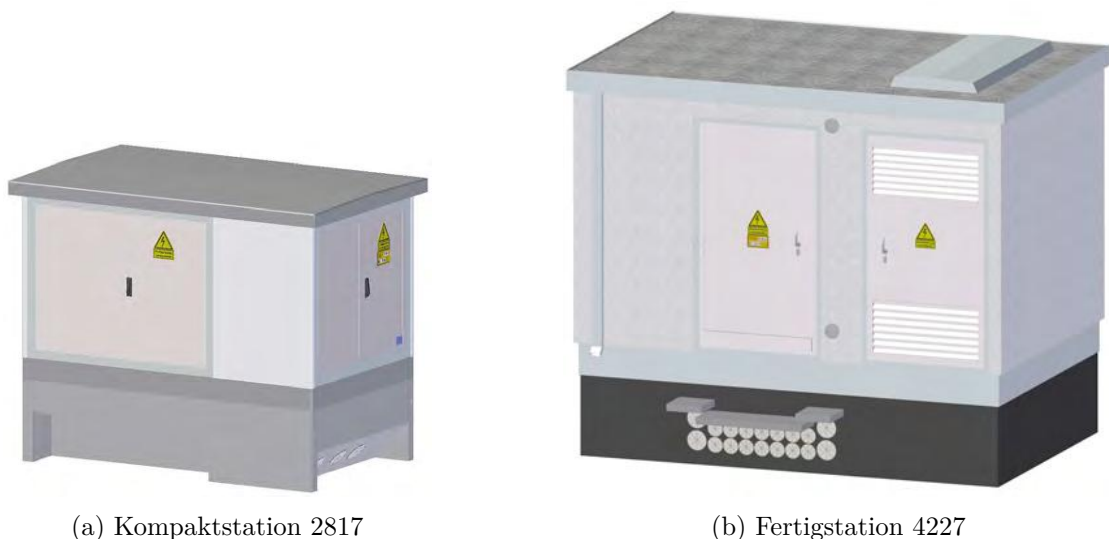


Abbildung 3.119: Außenansichten der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Ortsnetzstationen

- Die **Kompaktstation 2817** stellt eine besondere Bauart der Gebäudestation dar, da in ihr alle Betriebsmittel im Interesse der bestmöglichen Raumausnutzung dicht gedrängt zusammengefasst sind. Sie ist nicht begehbar und wird meist in Wohngebieten eingesetzt.
- Die **Fertigstation 4227** ist im Gegensatz zur Kompaktstation 2817 begehbar ausgeführt und zur Aufnahme größerer Transformatoren geeignet. Sie ist in Gegenden mit höherem Leistungsbedarf, beispielsweise in Gewerbegebieten, zu finden.

In Abbildung 3.119 sind die (nicht maßstabsgetreuen) Außenansichten beider Typen dargestellt. Die Grafiken wurden freundlicherweise bereitgestellt von der Bayernwerk Netz GmbH, Regensburg. Die unterhalb der Türen liegenden Teile der Baukörper befinden sich vollständig (Fertigstation 4227) bzw. zum größten Teil (Kompaktstation 2817) unterhalb der Erdoberfläche.

Der Vollständigkeit halber sei auf zwei besondere, heute unübliche Bauformen der Ortsnetzstation hingewiesen: Die Maststation besteht aus einem verstärkten Endmasten einer Mittelspannungs-Freileitung, an dessen Mastschaft in der Nähe der Leiterseile eine Plattform angebracht ist. Auf dieser Plattform steht ein MS-/NS-Transformator, dessen Oberspannungsseite mit den Leiterseilen verbunden ist. Der Niederspannungsabgang wird auf das Bodenniveau herabgeführt, wo sich die Niederspannungsverteilung befindet. Aus baustatischen Gründen ist diese Bauform auf Transformatoren kleinerer Nennleistung beschränkt, was insofern unerheblich ist, als Maststationen ohnehin nur in abgelegenen Gebieten mit geringem Leistungsbedarf Verwendung fanden. Da die Netzbetreiber, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, im Mittelspannungsnetz Freileitungen möglichst durch Erdkabel ersetzen wollen, werden Maststationen heute in aller Regel weder neu errichtet noch wesentlich geändert und sind daher für die Belange der 26. BImSchVVwV unerheblich. Eine verwandte Bauform stellt die Turmstation dar: Diese meist gemauerte Station ist hoch genug, um unmittelbar als Endmast zu- und abführender Mittelspannungs- und Niederspannungs-Freileitungen zu dienen. Ihre Betrachtung im Rahmen dieses Abschnitts erübrigt sich aus denselben Gründen wie bei der Maststation.

Die 26. BImSchVVwV sieht in ihrem Abschnitt 5.3.4 drei Minimierungsmöglichkeiten für Ortsnetzstationen vor:

1. „**Abstandsoptimierung**“

Feldverursachende Anlagenteile werden innerhalb des Betriebsraums mit größtmöglicher Distanz zu maßgeblichen Minimierungsorten errichtet; hierzu gehören die Ausrichtung der Niederspannungsseite von Transformatoren auf eine von maßgeblichen Minimierungsorten abgewandten Seite des Betriebsraums sowie das Verlegen von Leitungen auf kurzmöglichstem Weg an den von maßgeblichen Minimierungsorten am weitesten entfernten Wänden oder am Fußboden der Anlage. Bei Maststationen zählt die Erhöhung des Mastes zu den Maßnahmen. Voraussetzungen: Die Maßnahme kann bei Neubau und wesentlicher Änderung realisiert werden.

Wirksamkeit: Weil von den Leitern der Niederspannungsseite höhere Magnetfelder als von Leitern der Mittelspannungsseite ausgehen, sind Maßnahmen, die die Distanz von Anlagenteilen der Niederspannungsseite zu maßgeblichen Minimierungsorten erhöhen, in der Regel effektiver.

Hinweise: Bei wesentlicher Änderung kann der Aufwand abhängig vom Umfang der geplanten

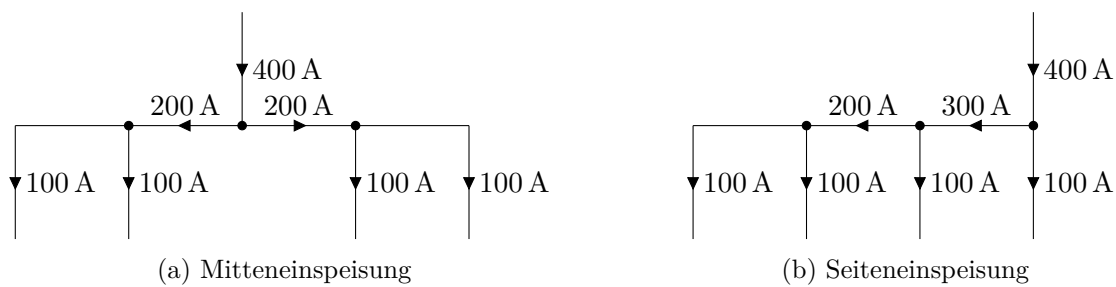


Abbildung 3.120: Beispielhafte Stromaufteilung auf der Niederspannungsverteilung

Änderung im Vergleich zum Neubau erheblich steigen. Zusätzlich kann sich durch die Umlegung von Betriebsmitteln der Aufwand für die Entstörung und die Instandsetzung erhöhen“.

2. „Minimieren der Distanzen zwischen Betriebsmitteln mit unterschiedlicher Phasenbelegung

Betriebsmittel oder Betriebsmittelelemente, die Spannungen und Ströme mit unterschiedlicher Phase führen, werden möglichst nah zusammen kompakt aufgebaut, damit sich die elektrischen und magnetischen Felder bestmöglich kompensieren.

Voraussetzungen: Die Maßnahme kann bei Neubau unter Einhaltung der technischen Randbedingungen realisiert werden; bei wesentlichen Änderungen sind die räumlichen Gegebenheiten und der Umfang der vorgesehenen Änderungen entscheidend. Mindestisolierluftstrecken zwischen Betriebsmitteln oder Betriebsmittelelementen mit unterschiedlichen elektrischen Potentialen müssen eingehalten werden.

Wirksamkeit: Die Wirksamkeit ist im unmittelbaren Umfeld der Anlage hoch.

Hinweise: Der zusätzliche Aufwand ist bei Neubau niedrig. Bei wesentlicher Änderung kann der Aufwand erheblich steigen“.

3. „Optimieren von Einspeisung und Abgängen der Niederspannungsverteilung

An der Niederspannungsverteilung wird der Anschluss der Leitung vom Transformator so platziert, dass die magnetfeldverursachenden Ströme auf der Niederspannungsverteilung minimiert werden. Die Mitte der Niederspannungsverteilung ist ein günstigerer Anschlussort als deren Seiten.

Voraussetzungen: Die Maßnahme kann bei Neubau und wesentlicher Änderung realisiert werden.

Wirksamkeit: Weil von den Leitern der Niederspannungsseite höhere Magnetfelder als von Leitern der Mittelspannungsseite ausgehen, sind Maßnahmen, die die Distanz von Anlagenteilen der Niederspannungsseite zu maßgeblichen Minimierungsorten erhöhen, in der Regel effektiver.

Hinweise: Wenn sich Verbrauch oder Einspeisung in den angeschlossenen Niederspannungstromkreisen ändern, kann sich die Anlage in einem nicht optimierten Zustand befinden. Der zusätzliche Aufwand ist niedrig“.

Die Funktionsweise der Optimierung von Einspeisung und Abgängen der Niederspannungsverteilung ist in Abbildung 3.120 beispielhaft für eine Phase dargestellt. Während in beiden Fällen vier Abgänge mit jeweils 100 A versorgt werden, beträgt die Stromstärke auf der Niederspannungsver-

teilung bei Mitteneinspeisung höchstens 200 A. Bei Seiteneinspeisung treten hingegen bis zu 300 A auf. Da die magnetische Flussdichte proportional zur Stromstärke ist, ist zu erwarten, dass die Mitteneinspeisung bei gleicher Versorgungsleistung eine günstigere Flussdichteverteilung aufweist als die Seiteneinspeisung.

Die von der 26. BImSchVVwV vorgesehene Feldminimierung bei Maststationen durch Masterhöhung kann als unwirksam angesehen werden: Aufgrund des Übersetzungsverhältnisses des Transformators fließt auf der Niederspannungsseite ein Vielfaches des mittelspannungsseitigen Stroms; die Niederspannungsverteilung stellt folglich die dominierende Quelle der magnetischen Flussdichte in der Umgebung der Station dar. Da sich die Niederspannungsverteilung auf Bodenniveau befindet, ist ihr Immissionsbeitrag von der Masthöhe unabhängig. Allenfalls kann eine Masterhöhung zu geringeren elektrischen Feldstärken und magnetischen Flussdichten der Freileitungs-Leiterseile führen, doch diese sind nicht der Station zuzurechnen.

In den folgenden Abschnitten sollen die dargestellten Minimierungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit an der Kompaktstation Typ 2817 und an der Fertigstation Typ 4227 betrachtet werden. Die WinField-Modelle der Stationen wurden freundlicherweise von der Bayernwerk Netz GmbH, Regensburg, bereitgestellt.

3.3.1 Kompaktstation 2817

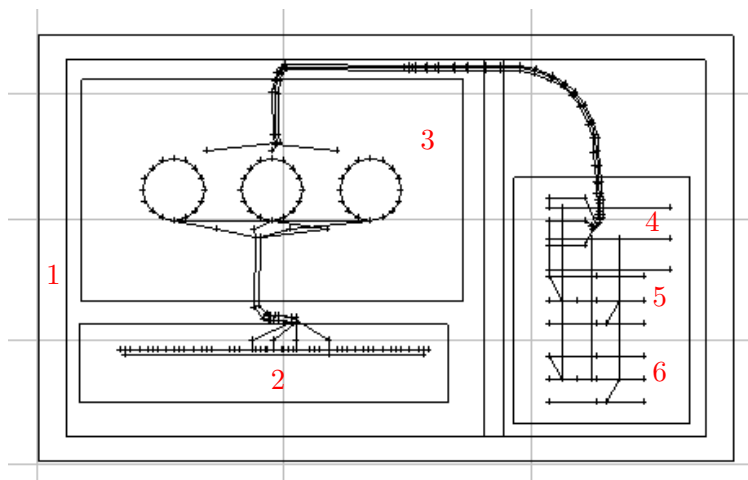


Abbildung 3.121: Aufbau einer Kompaktstation vom Typ 2817 (siehe Tabelle 3.15)

In Abbildung 3.121 ist der Aufbau einer Trafostation vom Typ 2817 als Schnitt in der Aufsicht dargestellt. Auf der Mittelspannungsseite ist die Station mit einer gasisolierten 20-kV-Mittelspannungsschaltanlage vom Typ Schneider Electric FBX-C C-C-T1 ausgestattet. Als Isoliergas wird Schwefelhexafluorid (SF_6) verwendet, das deutlich bessere Isoliereigenschaften als Luft bietet und damit eine kompaktere Bauform ermöglicht, ohne die eine Kompaktstation gar nicht realisiert werden könnte. Die Kehrseite von SF_6 liegt darin, dass es ein sehr hohes Treibhauspotential besitzt. Vonseiten der Netzbetreiber werden SF_6 -Anlagen daher nur dann eingesetzt, wenn eine gasisierte Ausführung eindeutige ökologische, technische und ökonomische Vorteile gegenüber anderen

Tabelle 3.15: Erläuterungen zu den Nummern in Abbildung 3.121 und 3.126

Nummer	Erläuterung
1	Gebäudehülle
2	Niederspannungsverteilung
3	MS-/NS-Transformator
4	Mittelspannungs-Transformatorfeld
5	Mittelspannungs-Kabelfeld (Ausgang)
6	Mittelspannungs-Kabelfeld (Eingang)

Technologien mit sich bringt⁸. Die Mittelspannungsschaltanlage verfügt über zwei Kabel- und ein Transformatorschaltfeld, die über eine mit bis zu 630 A belastbare Sammelschiene verbunden sind. Diese Stromstärke stellt in einem Mittelspannungsnetz einen eher theoretischen Wert dar, da in aller Regel die Strombelastbarkeit der zu- und abführenden Mittelspannungskabel niedriger liegt und die Sammelschiene folglich nicht voll belastet werden kann. Gleichwohl soll im Rahmen dieses Abschnitts ein Sammelschienenstrom von 630 A angenommen werden, da so die verschiedenen Bauformen von Mittelspannungsschaltanlagen hinsichtlich ihrer magnetischen Flussdichte besser verglichen werden können.

Im konkreten Fall fließen über das Eingangsfeld 630 A auf die Sammelschiene, von denen 610 A über das Ausgangsfeld die Station wieder verlassen und 20 A zum Transformator (630 kVA) geleitet werden. Auf der Niederspannungsseite ist eine Niederspannungs-Sammelschiene mit Mitteneinspeisung angeschlossen. Die Annahme der höchsten Auslastung des Transformators bringt es mit sich, dass auf den drei Phasen-Sammelschienen jeweils 909 A fließen (siehe Abschnitt 2.5), während die Neutralleiter-Sammelschiene ohne Strom bleibt. Die Niederspannungsverteilung verfügt über 12 Abgänge, die unter Annahme einer gleichmäßigen Auslastung jeweils einen Strom von 75,8 A führen.

Der Baukörper der Station hat eine Höhe von 1,5 m und enthält an drei Seiten Öffnungen: auf der in Abbildung 3.121 linken Seite dient eine Tür mit Lüftungsgitter zur Kühlung des Transformators und auf der unteren und rechten Seite befinden sich jeweils Türen für den Zugang zur Mittelspannungs- und Niederspannungs-Sammelschiene. Unterhalb der Mittelspannungsschaltanlage und damit unterhalb des Bodenniveaus befindet sich der Kabelkeller, der zur Einführung der Mittel- und Niederspannungskabel an die Schaltanlage bzw. an die Sammelschiene und zur Aufnahme des mittelspannungsseitigen Transformator-Anschlusskabels dient. Die drei Phasen-Sammelschienen der Niederspannungs-Verteilung befinden sich auf 0,49, 0,67 und 0,86 m Höhe. Die Sammelschiene der Mittelspannungsschaltanlage liegt auf 1,39 m Höhe. Ein Schnitt in 1 m Höhe über dem Bodenniveau geht damit durch die Niederführungen der Mittelspannungsschaltanlage und über die Niederspannungsverteilung und den Transformator hinweg, wobei bei letzterem gerade das obere Ende der mittelspannungsseitigen Durchführungsisolatoren berührt wird.

⁸Festgelegt in der „Selbstverpflichtung der SF₆-Produzenten, Hersteller und Betreiber von elektrischen Betriebsmitteln > 1 kV zur elektrischen Energieübertragung und -verteilung in der Bundesrepublik Deutschland zu SF₆ als Isolier- und Löschgas“, geschlossen im Mai 2005 zwischen SF₆-Lieferanten und Dachverbänden von Netzbetreibern und von Herstellern gasisolierter Betriebsmittel.

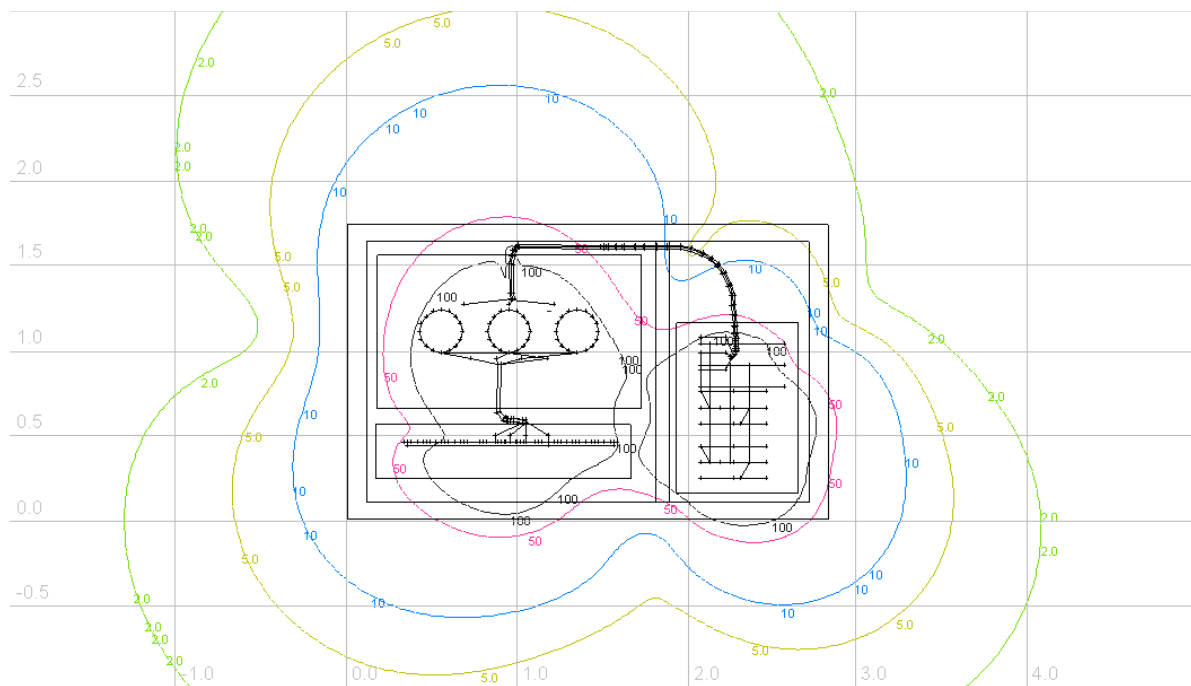


Abbildung 3.122: Magnet. Flussdichte in μT bei Kompaktstation 2817 mit NS-Mitteneinspeisung

In Abbildung 3.122 ist das zugehörige Isolinienbild der magnetischen Flussdichte als Querschnitt in 1 m Höhe über dem Erdboden dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die 100- μT -Linie an der Mittelspannungsschaltanlage geringfügig über den Baukörper der Station hinausreicht. Dies ist im Hinblick auf die Grenzwerteinhaltung unkritisch, denn die LAI-Durchführungshinweise legen in ihrem Abschnitt III.2.5.2 fest, dass die Grenzwerteinhaltung bei Stationen in 20 cm Abstand von der berührbaren und zugänglichen Oberfläche zu prüfen und zudem eine arithmetische Mittelung der Flussdichte über eine Fläche von 100 cm^2 durchzuführen ist. Aus Abbildung 3.122 geht hervor, dass bei der betrachteten Konfiguration die von der Mittelspannungsschaltanlage ausgehende Flussdichte höher ist als die der Niederspannungs-Sammelschiene. In aller Regel ist jedoch, wie oben beschrieben, mit einem dominierenden Immissionsbeitrag der Niederspannungs-Sammelschiene zu rechnen. In Abbildung 3.123 ist derselbe Querschnitt mit niedrigeren Flussdichte-Stufen über den gesamten Einwirkungsbereich der Station dargestellt, der gemäß Abschnitt 3.2.1.2 der 26. BImSchVVwV bei Ortsnetzstationen 10 m von der Einhausung beträgt.

Hinsichtlich der Abstandsoptimierung ist festzustellen, dass aufgrund der kompakten Bauweise des Typs 2817 keine andere Anordnung der Anlagenteile innerhalb der Gebäudehülle möglich ist. Einzige Ausnahme stellt die Mittelspannungsschaltanlage dar, die, zumindest im Falle einer Ausführung mit drei Feldern, längs der kurzen Seite der Station und damit weg von einem möglichen maßgeblichen Minimierungsort verschoben werden könnte, solange dadurch kein anderer maßgeblicher Minimierungsort schlechter gestellt wird. Aus Gründen der Kabelführung gibt es beim Typ 2817 nur eine sinnvolle Ausrichtung des Transformators, nämlich die in Abbildung 3.121 dargestellte, in der die Niederspannungsseite des Transformators der Außenwand abgewandt ist. Da auf der Niederspannungsseite stets ein deutlich höherer Strom als auf der Mittelspannungsseite eines Transformators fließt, stellt dies eine Abstandsoptimierung im Sinne der 26. BImSchVVwV dar. Je

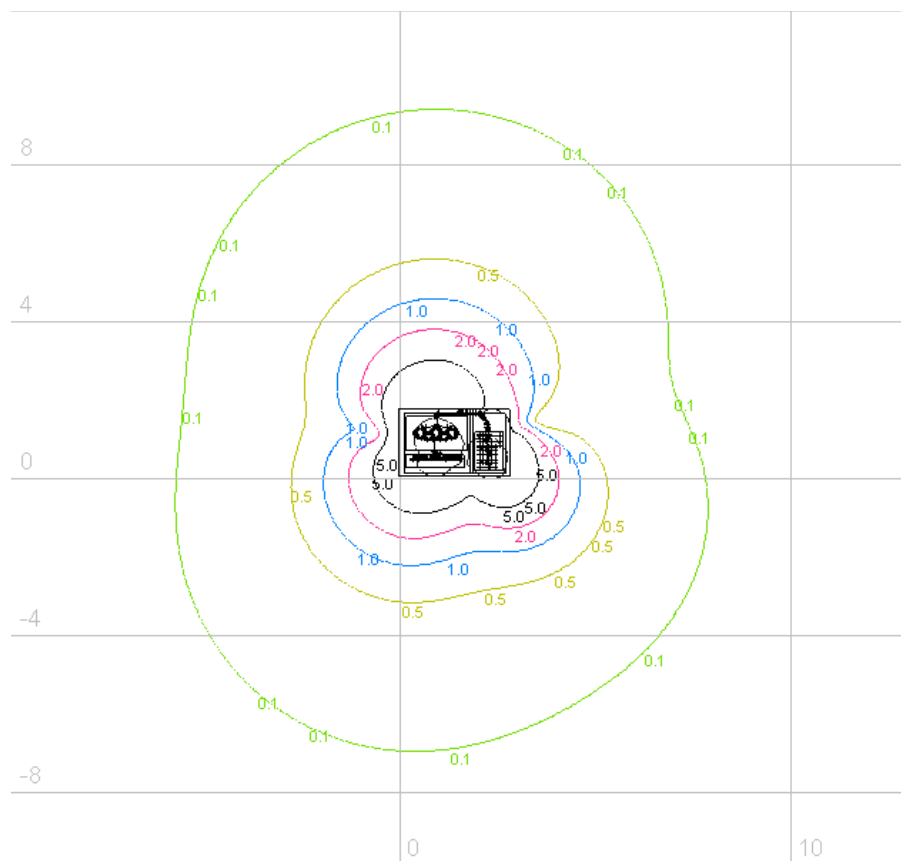


Abbildung 3.123: Magnet. Flussdichte in μT im gesamten Einwirkungsbereich bei Kompaktstation 2817 mit NS-Mitteneinspeisung

nachdem, wie in einem bestimmten Fall die maßgeblichen Minimierungsorte um eine Station herum angeordnet sind, könnte eine Abstandsoptimierung auch durch eine gedrehte Aufstellung der gesamten Station erreicht werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auf den drei Seiten der Station mit Öffnungen eine ausreichende Luftzufuhr zur Kühlung bzw. eine ausreichende Zugänglichkeit für Wartungs- und Schaltarbeiten gewährleistet sein muss.

Die Distanzen zwischen Betriebsmitteln unterschiedlicher Phasenbelegung können beim Typ 2817 nicht weiter verringert werden. Im Falle der Mittelspannungsschaltanlage ist deren innerer Aufbau durch den Hersteller festgelegt und bei der Niederspannungs-Sammelschiene muss aus Gründen der Arbeitssicherheit ein Mindestabstand zwischen den einzelnen Sammelschienen bestehen bleiben. Aus Gründen der Kabelführung stellt beim Typ 2817 die Mitteneinspeisung in die Niederspannungs-Sammelschiene die optimale Lösung dar. Es wäre aber auch eine Seiteneinspeisung in die Sammelschiene realisierbar. In Abbildung 3.124 ist dargestellt, welche magnetische Flussdichte sich dabei ergeben würde. Derselbe Querschnitt mit niedrigeren Flussdichte-Stufen über den gesamten Einwirkungsbereich findet sich in Abbildung 3.125. An allen Seiten der Station ist gegenüber der Mitteneinspeisung eine Zunahme der magnetischen Flussdichte zu erkennen, wobei diese auf derjenigen Seite der Station, auf der sich die Niederspannungs-Sammelschiene befindet, am deutlichsten ausfällt. Da sich durch die hier dargestellte Seiteneinspeisung auf der in Abbildung 3.124 rechten Hälfte der Niederspannungs-Sammelschiene höhere Stromwerte einstellen als bei Mitteneinspeisung,

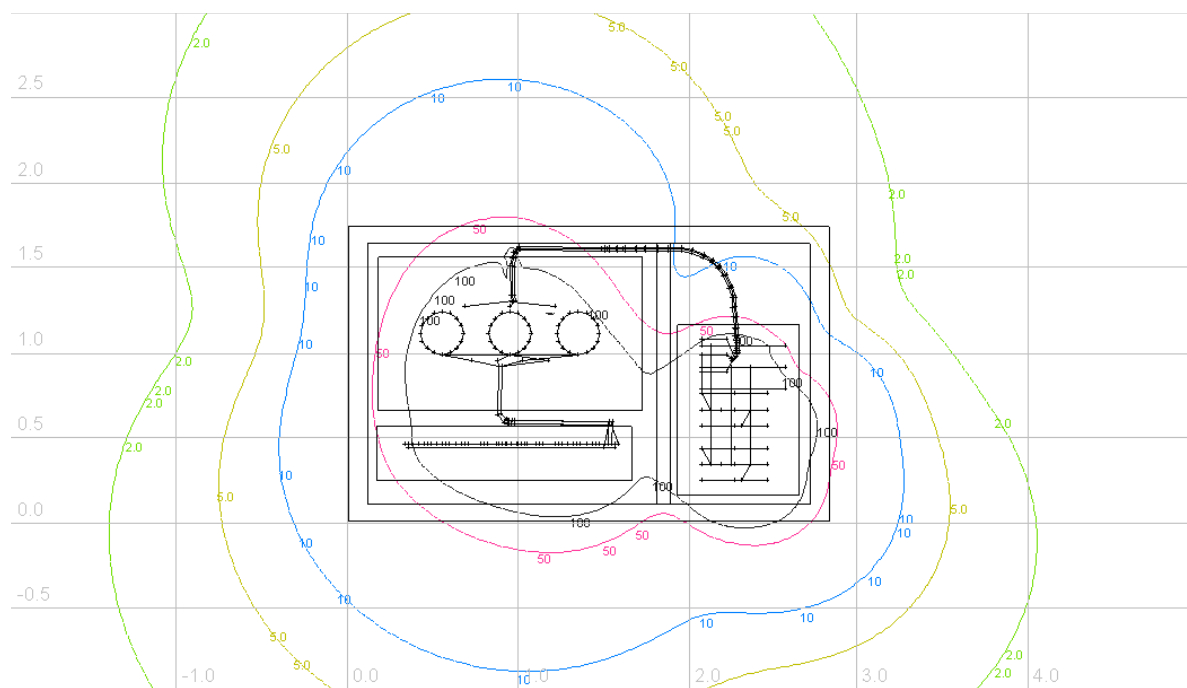


Abbildung 3.124: Magnet. Flussdichte in μT bei Kompaktstation 2817 mit NS-Seiteneinspeisung

ist dies nicht weiter verwunderlich. Da, wie oben erwähnt, die Mitteneinspeisung ohnehin die technisch günstigste Ausführung darstellt, ist diese Minimierungsmaßnahme beim Typ 2817 ab Werk umgesetzt.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass beim Typ 2817 die meisten Minimierungsmöglichkeiten bauartbedingt bereits ab Werk umgesetzt sind und dass weitere Minimierungsmöglichkeiten aufgrund der kompakten Bauart nicht in Frage kommen. Einzige Ausnahmen sind dabei die Verschiebung einer nicht die gesamte Breite des Baukörpers ausfüllenden Mittelspannungs-Schaltanlage und die gedrehte Aufstellung der gesamten Station.

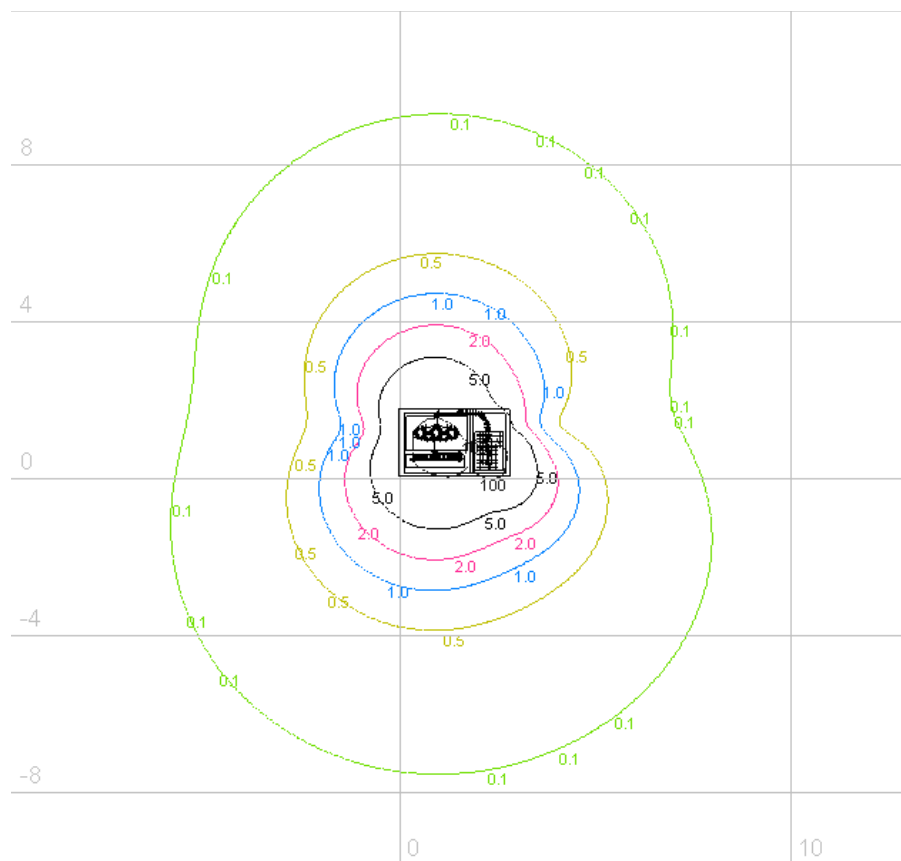


Abbildung 3.125: Magnet. Flussdichte in μT im gesamten Einwirkungsbereich bei Kompaktstation 2817 mit NS-Seiteneinspeisung

3.3.2 Fertigstation 4227

In Abbildung 3.126 ist der Aufbau einer Fertigstation vom Typ 4227 als Schnitt in der Aufsicht dargestellt. Im Gegensatz zum Typ 2817 bietet diese Station Platz für die Unterbringung einer luftisolierten Mittelspannungs-Schaltanlage vom Typ Driescher D24. Auch diese verfügt über eine Sammelschienenbelastbarkeit von 630 A. Dieser Strom wird durch das Kabel-Eingangsfeld auf die Sammelschiene gespeist, wobei im Ausgangsfeld 600 A die Station wieder verlassen. Über das Trafofeld fließen 30 A zum Transformator mit einer Nennleistung von 1 MVA. Im Freiraum zwischen Niederspannungs-Sammelschiene und Mittelspannungsschaltanlage befindet sich der Schaltraum, der über eine Tür von außen zugänglich ist. Dasselbe gilt für den Transformator, wobei dessen Tür zusätzlich Lüftungsschlitze enthält. Beide Türen befinden sich in Abbildung 3.126 auf der unteren Seite der Station. Aus diesem Grund wird die Fertigstation Typ 4227 in Ausnahmefällen auch dort eingesetzt, wo zwar keine erhöhte Leistung bereitgestellt werden muss, aber die Zugänglichkeit nur von einer Seite her gewährleistet werden kann. Unter Annahme einer vollen Auslastung des Transformators fließen auf der Niederspannungsseite jeweils 1443 A auf jeder Phase vom Transformator zur Niederspannungsverteilung, während der Neutraleiter ohne Strom bleibt (siehe Abschnitt 2.5). Die Niederspannungsverteilung verfügt über 13 Abgänge, von denen bei gleichmäßiger Auslastung jeder 111 A führt.

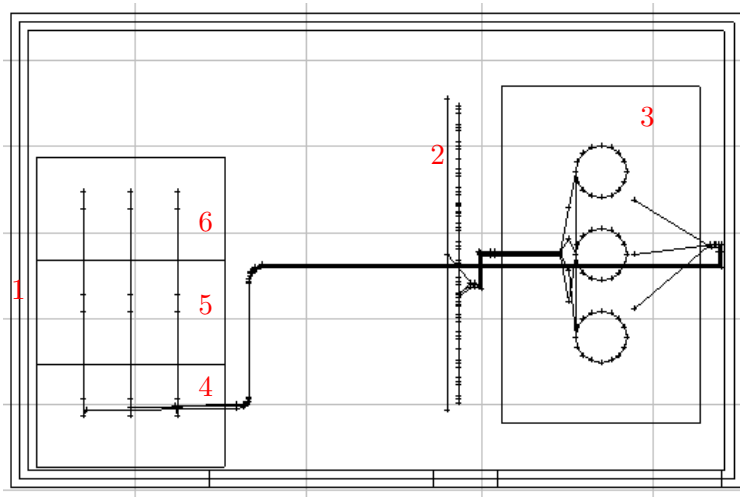


Abbildung 3.126: Aufbau einer Fertigstation vom Typ 4227 (siehe Tabelle 3.15)

Der Baukörper der Station hat eine Höhe von 2,5 m, wobei der Fußboden des Schaltraums auf Höhe des Erdbodens liegt. Unterhalb des Fußbodens liegt der Kabelkeller, der der Einführung der angeschlossenen Mittel- und Niederspannungskabel in die Station dient und der das Mittelspannungskabel vom Transformator zur Mittelspannungsschaltanlage aufnimmt. Die Phasen-Sammelschienen der Niederspannungsverteilung liegen auf 1,26, 1,44 und 1,63 m, die Sammelschiene der Mittelspannungsschaltanlage auf 1,63 m Höhe. Ein Schnitt in 1 m Höhe durch die Station geht folglich durch die nieder- und mittelspannungsseitigen Niederführungen von den jeweiligen Sammelschienen und durch den Transformator.

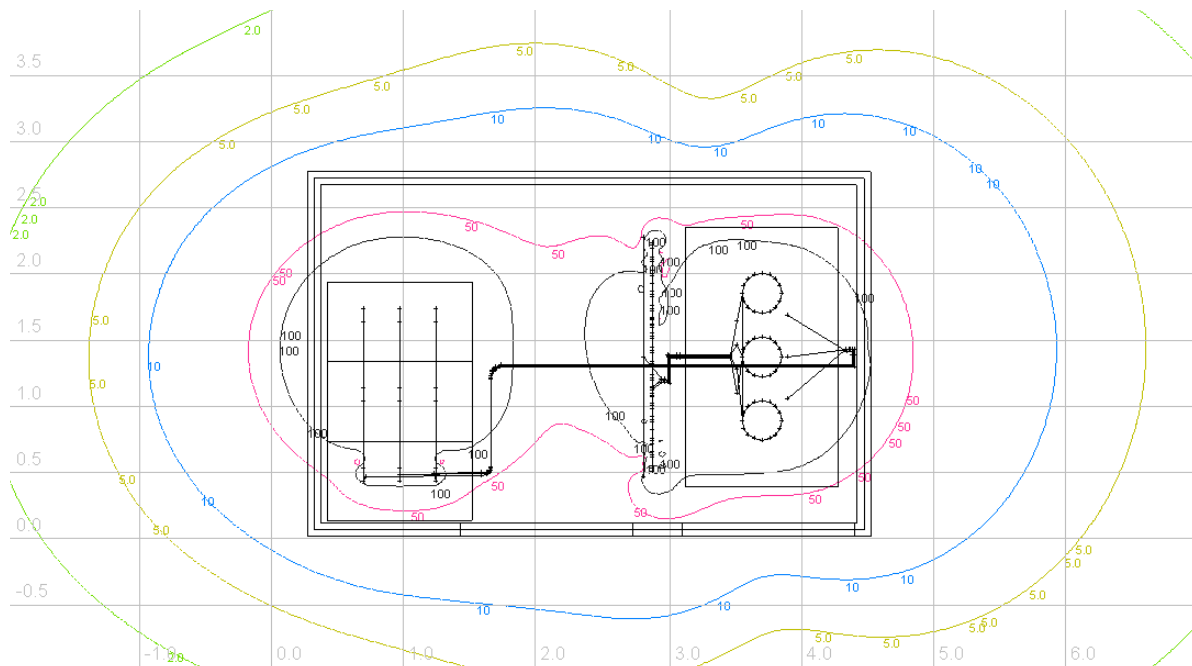


Abbildung 3.127: Magnet. Flussdichte in μT bei Fertigstation 4227 mit NS-Mitteneinspeisung

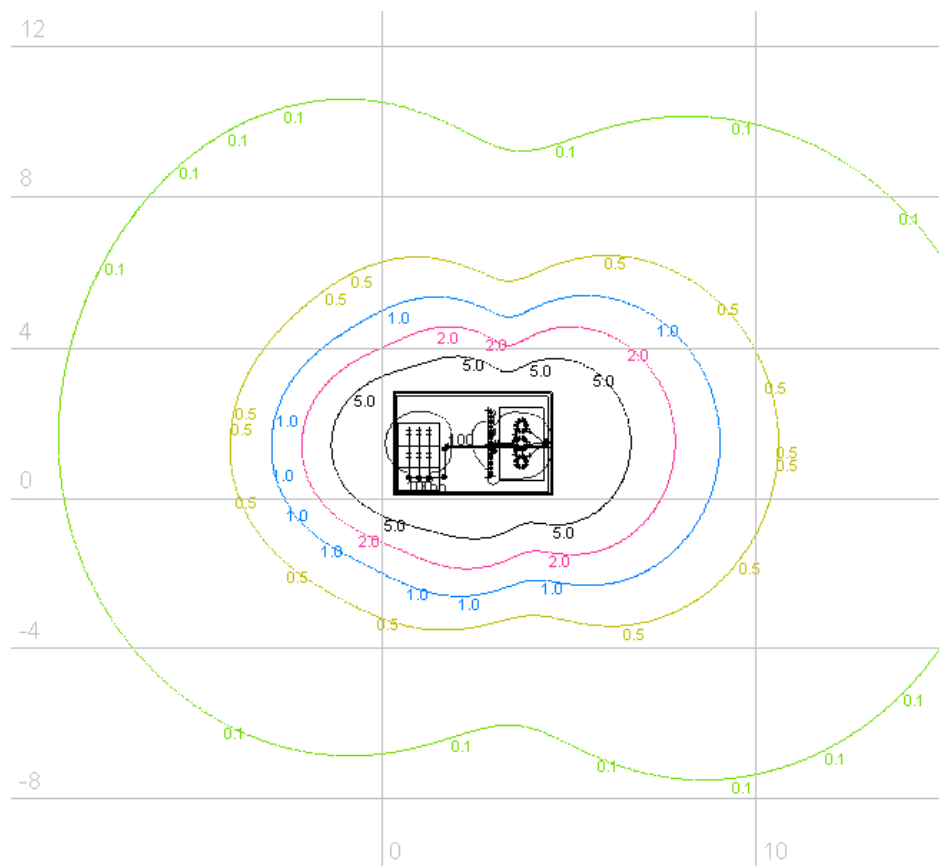


Abbildung 3.128: Magnet. Flussdichte in μT im gesamten Einwirkungsbereich bei Fertigstation 4227 mit NS-Mitteneinspeisung

In Abbildung 3.127 sind die Isolinien der magnetischen Flussdichte für den Typ 4227 in 1 m Höhe über dem Erdboden dargestellt. Es ist zu erkennen, dass hier die 100- μT -Linie bei den beiden Mittelspannungs-Kabelfeldern weiter über die Außenwand hinausgeht als beim Typ 2817 mit gasisolierten Schaltanlage, wobei die 20-cm-Grenze gemäß Abschnitt III.2.5.2 der LAI-Durchführungshinweise eingehalten ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass aufgrund des geringeren Isolationsvermögens der Luft gegenüber SF_6 größere Isolationsabstände zwischen den Phasen erforderlich sind. Die entsprechende Darstellung für den gesamten Einwirkungsbereich findet sich in Abbildung 3.128.

In Bezug auf die Abstandsoptimierung lässt sich feststellen, dass die Niederspannungsseite des Transformators bereits von der Außenwand des Baukörpers abgewandt ist. Auf diese Weise kann das Kabel vom Transformator zur Niederspannungsverteilung möglichst kurz gehalten werden. Dies ist technisch vorteilhaft, da auf dem Niederspannungskabel ein Vielfaches des auf dem mittelspannungsseitigen Anschlusskabel des Transformators fließenden Stromes übertragen wird und so die Verluste minimiert werden können. Aus demselben Grund ist die Niederspannungsverteilung unmittelbar neben dem Transformator platziert. Unter der Maßgabe, dass in der Mitte der Station ein Schaltraum mit Zugang zur Mittelspannungs- und Niederspannungs-Verteilung frei gehalten werden soll, ist die Anordnung der Betriebsmittel innerhalb der Station damit zwangsläufig und stellt

folglich zugleich eine technische Optimierung sowie eine Abstandsoptimierung nach 26. BImSchVVwV dar. Analog zur Kompaktstation 2817 kann die Mittelspannungsschaltanlage längs der kurzen Gebäudeseite verschoben werden, sofern nur drei Schaltfelder installiert sind. Eine gedrehte Aufstellung der Station scheidet in aller Regel aus, da nicht zuletzt zur Einbringung des Transformators ein möglichst ungehinderter Zugang zu den Türen der Station von der Straße aus erforderlich ist.

Im Hinblick auf die Minimierung der Distanzen zwischen Betriebsmitteln unterschiedlicher Phasenbelegung ist bei der Niederspannungsverteilung aus denselben Gründen wie bei der Kompaktstation keine weitere Annäherung der einzelnen Sammelschienen möglich. Wie oben erwähnt, könnte aufseiten der Mittelspannungsschaltanlage eine Verringerung der nach außen tretenden magnetischen Flussdichte durch den Einsatz einer SF₆-Anlage erreicht werden, doch diese Option scheidet aufgrund der oben erwähnten Selbstverpflichtung aus.

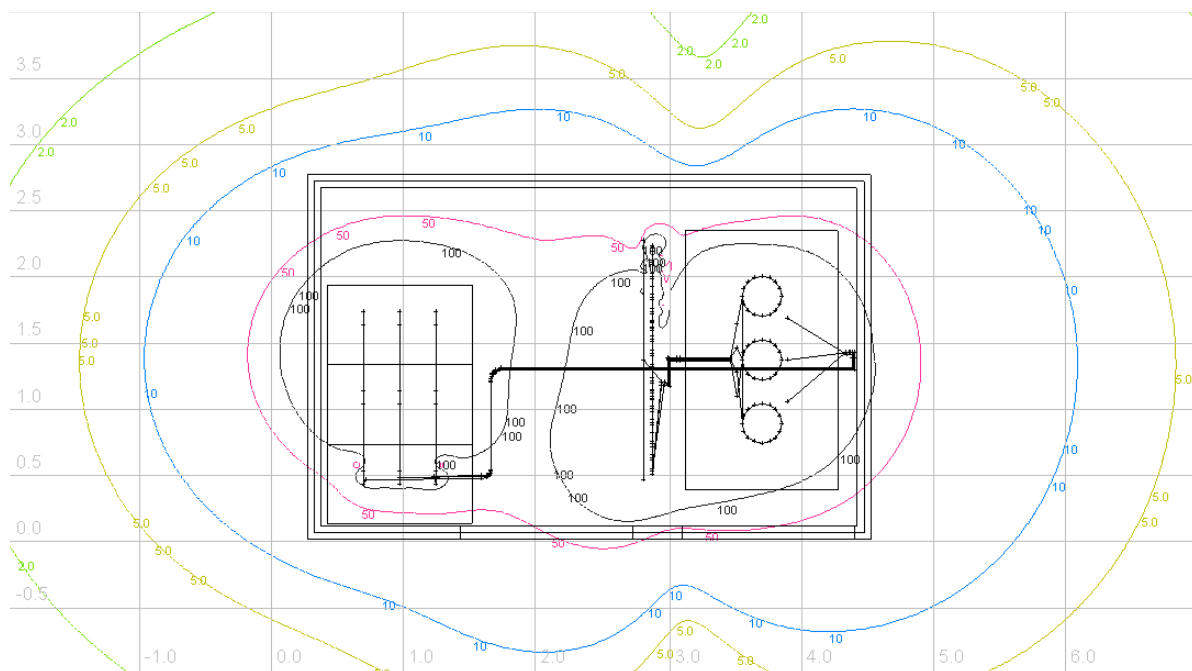


Abbildung 3.129: Magnet. Flussdichte in µT bei Fertigestation 4227 mit NS-Seiteneinspeisung

Zuletzt sollen wie bei der Kompaktstation die Auswirkungen einer Umstellung von Mitten- auf Seiteneinspeisung der Niederspannungsverteilung untersucht werden. Der zugehörige Flussdichte-Querschnitt in 1 m Höhe über dem Erdboden ist in Abbildung 3.129 zu sehen; die entsprechende Darstellung über den gesamten Einwirkungsbereich findet sich in Abbildung 3.130. Gegenüber der Mitteneinspeisung fällt auf, dass an allen Seiten der Station eine Erhöhung der Flussdichtewerte eintritt, wobei in einem schmalen Bereich unter- und oberhalb (im Sinne von Abbildung 3.129) des Transformators das Gegenteil der Fall ist. Dies ist insbesondere in größerer Entfernung von der Station zu erkennen und wahrscheinlich auf die gegenseitige Auslöschung von Flussdichtekomponenten zurückzuführen. Insgesamt ist festzustellen, dass die von der 26. BImSchVVwV beanspruchte ausnahmslose Überlegenheit der Mitten- gegenüber der Seiteneinspeisung zwar in den meisten, nicht aber in allen Fällen Gültigkeit hat. Unabhängig davon ist aber beim Typ 4227 im Interesse eines möglichst kurzen Niederspannungskabels die Mitteneinspeisung die technisch günstigste Lösung.

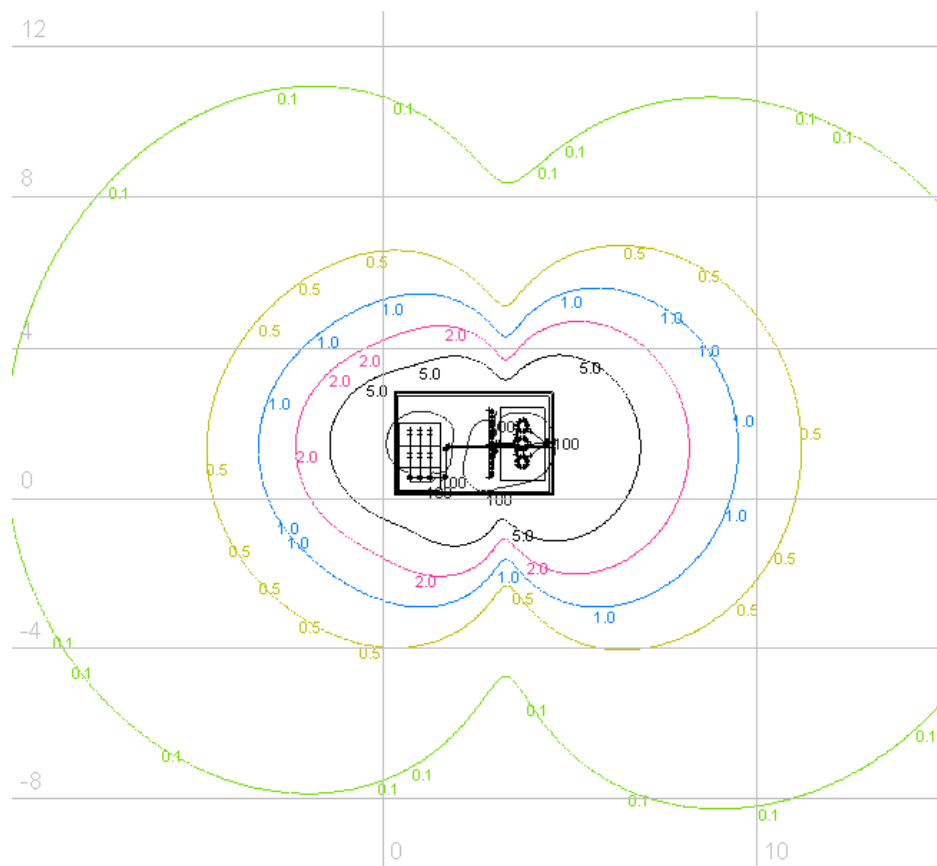


Abbildung 3.130: Magnet. Flussdichte in μT im gesamten Einwirkungsbereich bei Fertigestation 4227 mit NS-Seiteneinspeisung

3.3.3 Schlussfolgerungen

Anhand zweier typischer Ortsnetzstationen moderner Bauart wurde gezeigt, dass diese bereits aus anderen technischen Überlegungen heraus in vielerlei Hinsicht feldminimiert gebaut sind. Zusätzliche Minimierungsmaßnahmen können in den allermeisten Fällen nicht mehr durchgeführt werden. Weiterhin wurde gezeigt, dass die von der 26. BImSchVVwV vorgesehene Mitteneinspeisung der Niederspannungsverteilung an manchen Orten tatsächlich zu höheren Flussdichtewerten als die Seiteneinspeisung führen kann.

Wenn eine vorhandene Ortsnetzstation das Ende ihrer Lebensdauer erreicht hat, wird in der Regel an ihrer Stelle ein neuer Baukörper mit neuem Innenleben errichtet. In seltenen Fällen kommt es jedoch vor, dass ein bestehender Baukörper mit neuen Betriebsmitteln ausgerüstet wird. Wird die Niederspannungsverteilung ersetzt, so kann gegebenenfalls auf Mitteneinspeisung umgestellt werden, sofern die Kabelführung innerhalb der Station es gestattet. Dasselbe gilt für die Orientierung der Niederspannungsseite des Transformators. Die Anordnung der einzelnen Bestandteile innerhalb des Baukörpers kann dagegen in der Regel nicht geändert werden, da die Aufstellungsorte von Mittelspannungsschaltanlage, Transformator und Niederspannungsverteilung durch die vorhandenen Befestigungsmöglichkeiten und Durchbrüche in den Kabelkeller vorgegeben sind.

Alle in den obigen Abschnitten angestellten Überlegungen gelten grundsätzlich auch für Einbaustationen, wobei aber ein wesentlicher Unterschied hinsichtlich der Kabelführung besteht: Während es bei Kompakt- und Fertigstation möglich und vorteilhaft ist, die Verbindungskabel zwischen den einzelnen Komponenten durch den Kabelkeller zu führen, scheidet diese Option bei Einbaustationen aus, da diese in aller Regel über keinen eigenen Kabelkeller verfügen – oftmals befindet sich sogar die gesamte Station im Kellergeschoss. Die Verlegung der Kabel auf dem Fußboden oder inmitten des Raumes scheidet aus Arbeitssicherheitsgründen aus, sodass oftmals die Verlegung an der Decke des Raumes die einzige technische Möglichkeit darstellt. Sofern sich einer oder mehrere maßgebliche Minimierungsorte oberhalb der Stationsräume befinden und die Raumhöhe dies gestattet, kann eine (geringe) Minimierung der magnetischen Flussdichte an den maßgeblichen Minimierungsorten durch die Befestigung der Kabel an der Decke mit Abstandshaltern erreicht werden (Abstandsoptimierung).

3.4 Umspannwerke und Schalthäuser

Bei Neubauten oder Erneuerungen von Umspannwerken von der 110-kV- auf die Mittelspannungsebene wird der 110-kV-Teil üblicherweise als Freiluftanlage ausgeführt, sofern die räumlichen Verhältnisse dies erlauben. Eine Freiluftanlage ist in der Hochspannung kostengünstiger und wartungsfreundlicher als eine SF₆-Anlage, benötigt aber auch mehr Platz. In dicht bebauten Gebieten mit hohen Grundstückspreisen überwiegt daher die Ausführung als Innenraum-Umspannwerk mit gasisolierter 110-kV-Anlage in einem ein- oder mehrstöckigen Gebäude. Sowohl bei Innenraum- als auch bei Freiluft-Umspannwerken ist für den Mittelspannungsteil die gasisolierte Bauweise Stand der Technik. In wenigen Fällen existieren reine 110-kV-Schaltanlagen ohne Transformatoren und ohne Mittelspannungsteil; in der Mittelspannung kommt die entsprechende Anlagenart häufiger vor und wird dort oftmals als Schalthaus bezeichnet. Da beide Anlagenarten Teil eines Umspannwerks sind, werden sie im Folgenden gemeinsam betrachtet. Die 26. BImSchVV sieht in ihrem Abschnitt 5.3.3 Minimierungsmaßnahmen für Drehstromumspan- und Drehstromschaltanlagen ab Mittelspannung und höher sowie für Umrichter- und Kompensationsanlagen vor. Da Umrichter- und Kompensationsanlagen in der Hoch- und erst recht in der Mittelspannung auf wenige Ausnahmefälle beschränkt sind, bleiben sie im Folgenden außer Acht.

Die bauliche Ausführung der Gebäude von Innenraum-Umspannwerken hat sich in aller Regel nach den Platzverhältnissen und nach der umgebenden Bebauung am vorgesehenen Standort zu richten, woraus eine unübersehbare Vielfalt auch hinsichtlich der Anordnung der elektrischen Anlagen folgt. Freiluft-Umspannwerke werden dagegen auf einer freien Fläche errichtet, sodass hier, jedenfalls innerhalb des Hochspannungs- und des Mittelspannungsteils, eine standardisierte Bauweise häufig ist. Die Anordnung der Anlagen auf dem Gelände ist wiederum von den örtlichen Gegebenheiten abhängig. Im Folgenden soll eine typische Bauform eines Freiluft-Umspannwerks mit einfacher Sammelschiene, zwei Leitungs- und zwei Transformatorfeldern, die freundlicherweise von der Bayernwerk Netz GmbH, Regensburg, zur Verfügung gestellt wurde, hinsichtlich ihrer Minimierungsmöglichkeiten untersucht werden. Wie bei Neubau oder wesentlicher Änderung dieser Umspannwerksbauform üblich, erfolgt die Anbindung auf der Hochspannungsseite über Freileitungen und auf der Mittelspannungsseite über Erdkabel.

Tabelle 3.16: Erläuterungen zu den Nummern in Abbildung 3.131

Nummer	Erläuterung
1	Leitungsfeld (1140 A)
2	Leitungsfeld (930 A)
3	Sammelschiene
4	Transformatorfeld (abgeschaltet)
5	Transformatorfeld (210 A)
6	Transformator (40 MVA)
7	Schalthaus
8	Eigenbedarfstransformator (400 kVA)
9	Zaun
10	Mittelspannungskabel

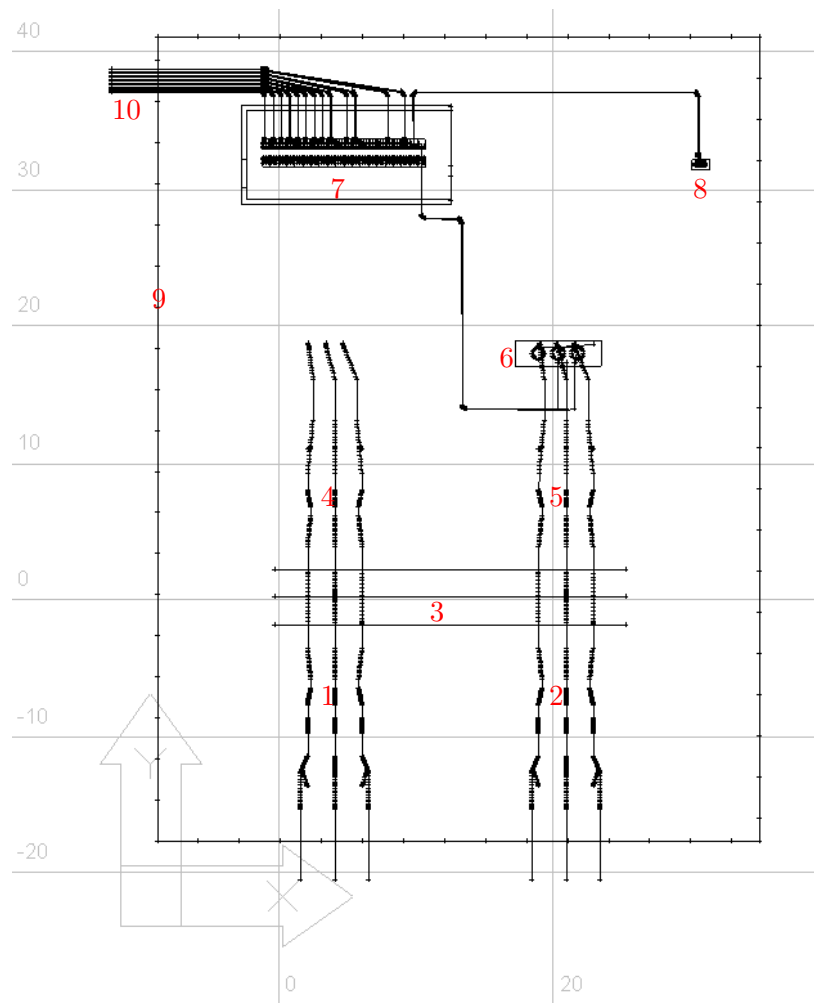


Abbildung 3.131: Aufsicht des Umspannwerksmodells (siehe Tabelle 3.16, Maßangaben in m)

In Abbildung 3.131 ist die Aufsicht, in Abbildung 3.132 die Seitenansicht und in Abbildung 3.133 eine dreidimensionale Sicht des Umspannwerks dargestellt. Alle Richtungsangaben in diesem Abschnitt beziehen sich auf Abbildung 3.131. Aus Gründen der Versorgungssicherheit ist es üblich, dass in Umspannwerken ein Transformator als Reserve vorgehalten wird. Eine Ausnahme von dieser Regel kann bei Umspannwerken vorkommen, die keine Versorgungsaufgabe erfüllen, sondern lediglich zur Rückspeisung der beispielsweise von einer größeren Photovoltaik-Anlage oder von einem Wasserkraftwerk erzeugten Leistung dienen – bei Rückspeise-Umspannwerken wird ein Ausfall des Umspannwerks infolge eines Transformatorausfalls in Kauf genommen. Nachdem in der Umgebung solcher Rückspeise-Umspannwerke kaum maßgebliche Minimierungsorte zu erwarten sind, wird im Rahmen dieses Abschnitts ein Umspannwerk der allgemeinen Versorgung mit einem in Betrieb befindlichen und einem Reservetransformator betrachtet. Da der Reservetransformator weder zur elektrischen Feldstärke noch zur magnetischen Flussdichte beiträgt, ist er im Modell nicht berücksichtigt; das zugehörige Transformatorfeld ist strom- und spannungsfrei.

In Einklang mit Abschnitt 4 der 26. BImSchVVwV wird von der höchstmöglichen Auslastung des 110-kV-Leitungsfeldes auf der linken Seite mit 1140 A ausgegangen. Der Transformator von

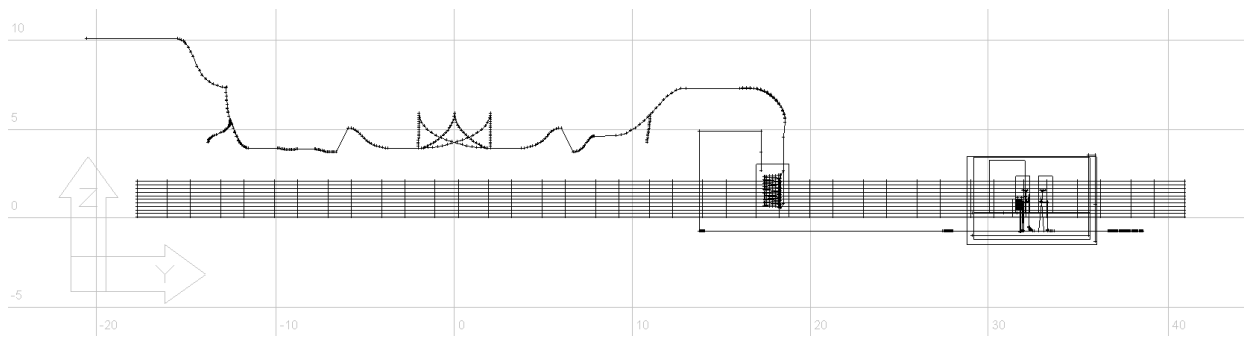


Abbildung 3.132: Seitenansicht des Umspannwerksmodells (Maßangaben in m)

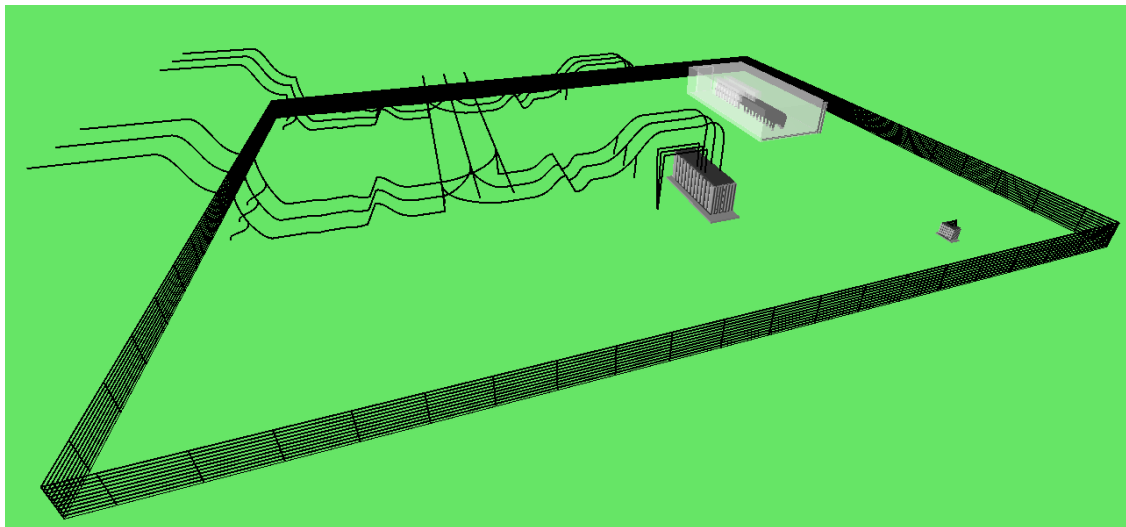


Abbildung 3.133: Dreidimensionale Ansicht des Umspannwerksmodells

110 auf 20 kV hat eine Nennleistung von 40 MVA, was auf 110-kV-Seite einem Strom von 210 A und auf Mittelspannungsseite einem Strom von 1154,7 A entspricht (siehe Abschnitt 2.5). Da das Transformatorfeld auf der linken Seite abgeschaltet ist, fließen auch auf der Sammelschiene 1140 A, die sich in 210 A für den Transformator und 930 A für das Leitungsfeld auf der rechten Seite aufteilen. Der Stromfluss auf der 110-kV-Seite mit einem beziehenden und einem rückspeisenden Leitungsfeld entspricht den üblichen Verhältnissen bei einer Einschleifung.

Von der Unterspannungsseite des Transformators führt ein Kabel in das Schalthaus. Im Schalthaus (siehe Abbildung 3.134) befinden sich zwei Reihen gasisolierter Schaltfelder des Typs Schneider Electric GMA mit einem höchstzulässigen Sammelschienenstrom von jeweils 1250 A. Aus Gründen der Versorgungssicherheit ist jeweils nur eine Sammelschiene in Betrieb, während die andere als Reserve dient. Dementsprechend sind jeweils zwei gegenüberliegende Schaltfelder für denselben Mittelspannungs-Abgang zuständig. Im gewählten Beispiel ist die obere Sammelschiene in Betrieb; die untere Sammelschiene ist nur zur besseren Veranschaulichung dargestellt. Am rechten Ende der Sammelschiene erfolgt die Einspeisung vom Transformator; im unmittelbar angrenzenden Schaltfeld ist der Eigenbedarfstransformator (20 kV auf 400 V) des Umspannwerks angeschlossen. Der Eigenbedarfstransformator ist im Falle gelöschter Mittelspannungsnetze meist in gemeinsamer

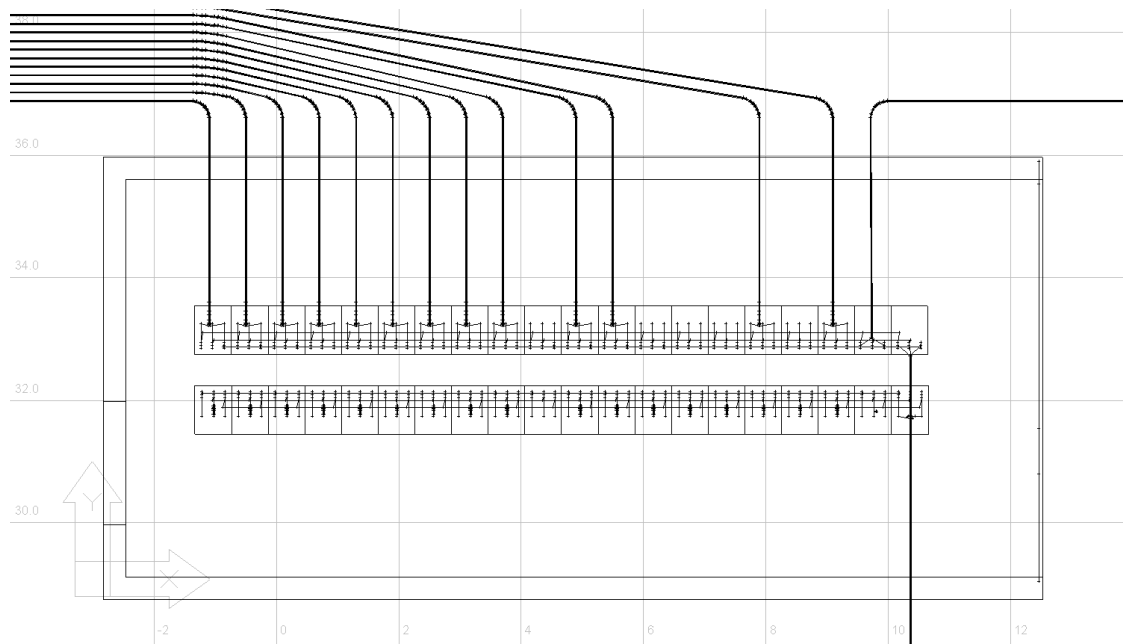


Abbildung 3.134: Aufsicht des Schalthauses im Umspannwerksmodell (Maßangaben in m)

Bauform mit der Erdschlusskompensationsspule ausgeführt. Da ein zu kompensierender Erdschluss den Ausnahmefall darstellt, wird der dabei fließende Strom nicht weiter berücksichtigt. Dies steht im Einklang mit der Begriffsbestimmung 2.8 der 26. BImSchVVwV, wo für die höchste betriebliche Anlagenauslastung der maximale **betriebliche** Dauerstrom festgelegt wird. Aus demselben Grund bleibt auch eine gegebenenfalls vorhandene Erdschlusskompensationsspule auf 110-kV-Seite außen vor.

Der Eigenbedarfstransformator hat eine Leistung von 400 kVA. Auch wenn bei einem Umspannwerk dieser Größe nicht mit einer vollständigen Ausnutzung dieser Leistung zu rechnen ist, wird der Transformator mit seiner Nennleistung modelliert, was auf Mittelspannungsseite einem Strom von 11,5 A und auf Niederspannungsseite einem Strom von 577 A entspricht (siehe Abschnitt 2.5). Das vom Transformator gespeiste Niederspannungsnetz wird im Modell nicht weiter berücksichtigt, da die Gültigkeit der 26. BImSchV und damit auch die der 26. BImSchVVwV bei einer Nennspannung von 1000 V endet. Das zwischen Eigenbedarfstransformator und Schalthaus befindliche Betriebsgebäude ist genauso wenig dargestellt, da sich in ihm keine Betriebsmittel mit einer Nennspannung von mehr als 1 kV befinden. Abzüglich des Eigenbedarfs bleibt damit ein Strom von 1143,2 A in der Mittelspannungs-Sammelschiene, der sich, analog zu den Verhältnissen bei den Ortsnetzstationen, gleichmäßig mit je 88 A auf die 13 belegten Abgänge verteilt; die unbelegten Abgänge dienen als Reserve für mögliche Erweiterungen bzw. zum (hier nicht dargestellten) Anschluss des zweiten HS/MS-Transformators.

Alle Kabel sind in einer Tiefe von 80 cm verlegt. Die 110-kV-Schaltfelder weisen einen Querschnitt von 625 mm² Aluminium auf; die 110-kV-Sammelschienen sind als Aluminiumrohre mit einem Außendurchmesser von 80 mm ausgeführt. Da ausschließlich auf 110-kV-Seite luftisolierte Betriebsmittel vorhanden sind, können auch nur diese zur elektrischen Feldstärke beitragen. Um dies korrekt in WinField umzusetzen, sind die mittelspannungsseitigen Betriebsmittel im Umspannwerksmo-

dell mit einer Betriebsspannung von lediglich 10 V modelliert. Die für die magnetische Flussdichte bedeutsamen Ströme entsprechen dagegen in allen Fällen den obigen Festlegungen.

Der Zaun hat eine Höhe von 2 m und die Zaunpfosten haben, außer an den Grundstücksecken, einen Abstand von jeweils 3 m zueinander. Die waagrechten Elemente des Zaungitters sind in einem 20-cm-Raster angeordnet. Sowohl Pfosten als auch Gitterelemente haben jeweils einen Querschnitt von 10 mm^2 und sind aus Stahl mit einer spezifischen Leitfähigkeit von $\sigma = 5 \cdot 10^6 \text{ 1}/\Omega \text{ m}$. Zur korrekten Modellierung des Zauns sowohl bei der elektrischen Feldstärke wie auch bei der magnetischen Flussdichte wird in WinField mit aktivierter automatischer Berechnung von Induktionsströmen gearbeitet.

3.4.1 Minimieren der Distanzen zwischen Betriebsmitteln mit unterschiedlicher Phasenbelegung

Als eine von zwei Minimierungsmaßnahmen für Umspannwerke und Schalthäuser beschreibt die 26. BImSchVVwV in ihrem Abschnitt 5.3.3.2 das Minimieren der Distanzen zwischen Betriebsmitteln mit unterschiedlicher Phasenbelegung:

„Betriebsmittel oder Betriebsmittelelemente, die Spannungen und Ströme mit unterschiedlicher Phase führen wie Stromschienen und Schaltfelder, werden möglichst nah zusammen kompakt aufgebaut, damit sich die elektrischen und magnetischen Felder bestmöglich kompensieren.“

Voraussetzungen: Die Maßnahme kann bei Neubau unter Einhaltung der technischen Randbedingungen realisiert werden. Bei wesentlicher Änderung sind die räumlichen Gegebenheiten und der Umfang der vorgesehenen Änderungen entscheidend. Mindestisolierluftstrecken zwischen Betriebsmitteln oder Betriebsmittelelementen mit unterschiedlichen elektrischen Potentialen müssen eingehalten werden.

Wirksamkeit: Die Wirksamkeit ist vom Umfang der Maßnahme abhängig. Sie wird von anderen Anlagenparametern beeinflusst und ist abhängig vom Abstand zwischen den Betriebsmitteln.

Hinweise: Geringe Distanzen zwischen Betriebsmitteln oder Betriebsmittelelementen, die unterschiedlichen Stromkreisen zugeordnet sind, können sich nachteilig auf die Verfügbarkeit auswirken. Der zusätzliche Aufwand ist bei Neubau niedrig“.

Da die gasisolierten Mittelspannungs-Schaltfelder fertig vom Hersteller geliefert werden, kann der Netzbetreiber bei ihnen keine Distanzoptimierung innerhalb der einzelnen Blöcke mehr durchführen. Auch die Aufstellung der Schaltfelder Rücken an Rücken in der Mitte des Schalthauses, wie im vorliegenden Beispiel bereits aus praktischen Gründen der Fall, stellt keine Distanzoptimierung dar, da die Sammelschienen nur abwechselnd in Betrieb sind und dadurch keine gegenseitige Feldkompensation der beiden Sammelschienen stattfinden kann. Eine Abstandsminimierung der Mittelspannungskabel ist genauso wenig möglich, da diese bereits im Interesse einer wirtschaftlichen Bauausführung nicht weiter auseinander liegen als technisch notwendig (siehe Abschnitt 3.2.3.4). Als einzige Möglichkeit verbleibt damit die Distanzoptimierung der 110-kV-Freiluftanlage. Gemäß Abschnitt 5.3 und Tabelle 1 der Norm VDE 0101-1 kann bei luftisolierten Anlagen mit einer höchsten Spannung von 123 kV und einer Bemessungs-Kurzzeitwechselspannung von 230 kV (beides Effektivwerte) der Abstand zwischen spannungsführenden Teilen verschiedener Phasen bis auf 1,1 m verringert werden, ohne dass eine zusätzliche Stoßspannungsprüfung erforderlich ist [34].

Bei gasisolierten 110-kV-Schaltanlagen, wie sie in Innenraum-Umspannwerken vorkommen, gilt dagegen ebenso wie in der Mittelspannung, dass deren mechanischer Aufbau vonseiten des Herstellers festgelegt ist. Die Distanzminimierung scheidet damit bei Innenraum-Umspannwerken aus.

Ähnlich wie bei Freileitungen (siehe Abschnitt 3.1.4.2) ist es aus Gründen der Versorgungssicherheit auch in Umspannwerken erforderlich, Wartungs- oder Bauarbeiten an einem (freigeschalteten) Teil der Anlage durchzuführen, während andere Teile weiterhin in Betrieb sind und unter Spannung stehen. Um einen ausreichenden Sicherheitsabstand für die Durchführung solcher Arbeiten zu gewährleisten, können die Abstände zwischen den Transformator- und Leitungsfeldern kaum mehr verringert werden. Innerhalb der Felder und innerhalb der Sammelschiene wäre aber eine derartige Distanzoptimierung möglich. Es soll anhand des vorliegenden Modells untersucht werden, inwieweit dadurch eine Feldminimierung erreicht werden kann.

Es ist zu beachten, dass sich der oben ermittelte Mindestabstand zwischen spannungsführenden Teilen unterschiedlicher Phasen von 1,1 m auf die jeweils nächstliegenden Punkte der spannungsführenden Teile bezieht. Dies führt dazu, dass die Achsabstände der 80 mm dicken Sammelschienenrohre nur um 80 cm auf 1,2 m verringert werden können. Ähnliches gilt für die Leitungs- und Transformatorfelder: Werden hier die Spannungs- und Stromwandler mit einem Durchmesser von etwa 30 cm berücksichtigt, so können die einzelnen Phasen nur um 30 cm auf einen Achsabstand von 1,45 m an der Stelle der größten Annäherung zusammengeschoben werden. Auf eine Anpassung der Verbindungsstellen der Sammelschienen mit den Feldern und des Transformatorfeldes mit dem Transformator wird an dieser Stelle aufgrund der geringen zu erwartenden Auswirkungen verzichtet; im Übrigen bleiben Spannungen und Stromstärken unverändert.

In Abbildung 3.135 ist der Vergleich der Flussdichteverteilung zwischen der ursprünglichen und der distanzminimierten Anordnung dargestellt. Eine nennenswerte Veränderung ist allenfalls beim Verlauf der 10- μ T-Linie im unteren Teil der Aufsicht zu erkennen. Bei der elektrischen Feldstärke (siehe Abbildung 3.136) sind lediglich geringfügige Veränderungen der 0,2-kV/m-Linie am in der Aufsicht unteren Anlagenzaun zu beobachten. Wird der gesamte Einwirkungsbereich, der gemäß 26. BImSchVVwV bei Umspann- und Schaltanlagen bis einschließlich 110 kV 50 m beträgt, betrachtet (Abbildungen 3.137 bis 3.140), bestätigt sich der Eindruck, dass die Feldstärke- bzw. Flussdichteverringering durch die Distanzminimierung kaum sichtbar ist. Ferner ist zu bedenken, dass näher beisammen stehende Phasenleiter von Feldern oder Sammelschienen im Kurzschlussfall zu höheren mechanischen Kräften führen, was durch aufwendigere und damit teurere Fundamente ausgeglichen werden muss. Insgesamt erscheint die Verhältnismäßigkeit dieser Minimierungsmaßnahme fraglich.

3.4.2 Abstandsoptimierung

Die 26. BImSchVVwV schreibt in ihrem Abschnitt 5.3.3.1 zur Abstandsoptimierung:

„Feldverursachende Anlagenteile werden innerhalb des Betriebsgeländes oder des Betriebsgebäudes mit größtmöglicher Distanz zu maßgeblichen Minimierungsorten errichtet; hierzu zählt auch die Erhöhung der Portale für zu- und abführende Freileitungen.

Voraussetzungen: Die Maßnahme kann bei Neubau und wesentlicher Änderung realisiert werden.

Wirksamkeit: Die Wirksamkeit ist vom Umfang der Maßnahme abhängig.

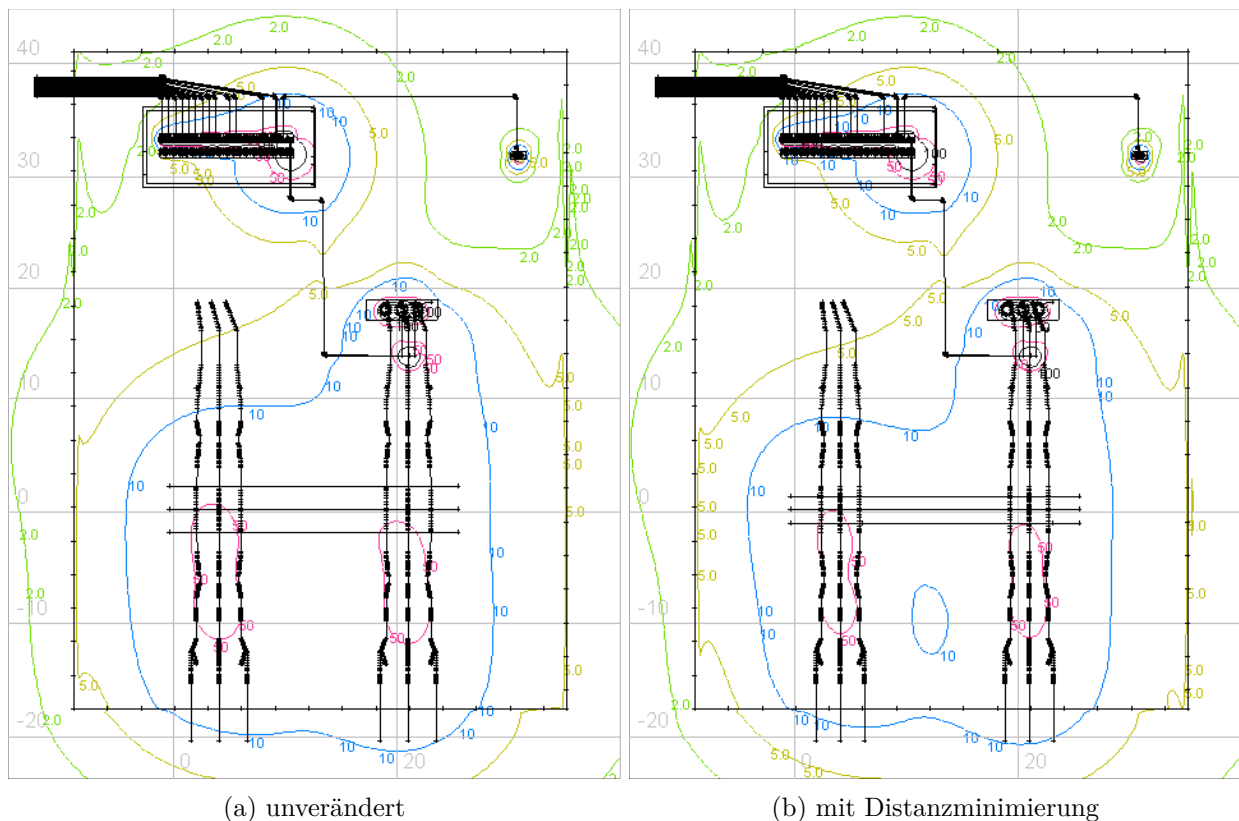


Abbildung 3.135: Flussdichteverteilung in μT beim Umspannwerksmodell im Nahbereich in 1 m Höhe

Hinweise: Bei wesentlicher Änderung kann der Aufwand abhängig vom Umfang der geplanten Änderung im Vergleich zum Neubau erheblich steigen. Praktische Erfahrungen liegen nicht vor“.

Hinsichtlich der Wirksamkeit und der damit einhergehenden Vor- und Nachteile einer Erhöhung der Freileitungsportale sei auf Abschnitt 3.1.2 zur Höherlegung von Freileitungen verwiesen.

Die technisch einfachste Art der Abstandsoptimierung stellt die Vergrößerung des Umspannwerksgrundstücks dar, die dazu führt, dass der Zaun weiter von den Betriebsmitteln entfernt liegt. Wie in den Abbildungen 3.137 und 3.139 zu erkennen, ließe sich beispielsweise mit einer allseitigen Versetzung des Zaunes um 20 m nach außen eine deutliche Verringerung der außerhalb des Zaunes vorherrschenden Flussdichten und Feldstärken erzielen. Ausgenommen von diesem Effekt wären lediglich diejenigen Stellen, an denen die zu- und abführenden Freileitungen und Kabel die Grundstücksgrenze überqueren. Eine Vergrößerung des Umspannwerksgrundstückes bringt aber auch höhere Kosten für den Grunderwerb und für den Grundstücksunterhalt mit sich. Befindet sich das Umspannwerk beispielsweise in landwirtschaftlich genutztem Gebiet, so mögen die Mehrkosten für ein größeres Grundstück vielleicht noch tragbar erscheinen, doch in einer solchen Gegend befinden sich keine maßgeblichen Minimierungsorte im Einwirkungsbereich des Umspannwerks, sodass eine Minimierung weder sinnvoll noch vorgeschrieben wäre. In besiedelten Gebieten ist dagegen durchaus mit dem Vorhandensein von maßgeblichen Minimierungsorten in der Nachbarschaft des Umspannwerks zu rechnen, doch zugleich sind dort die Bodenpreise um ein Vielfaches höher – einmal ganz

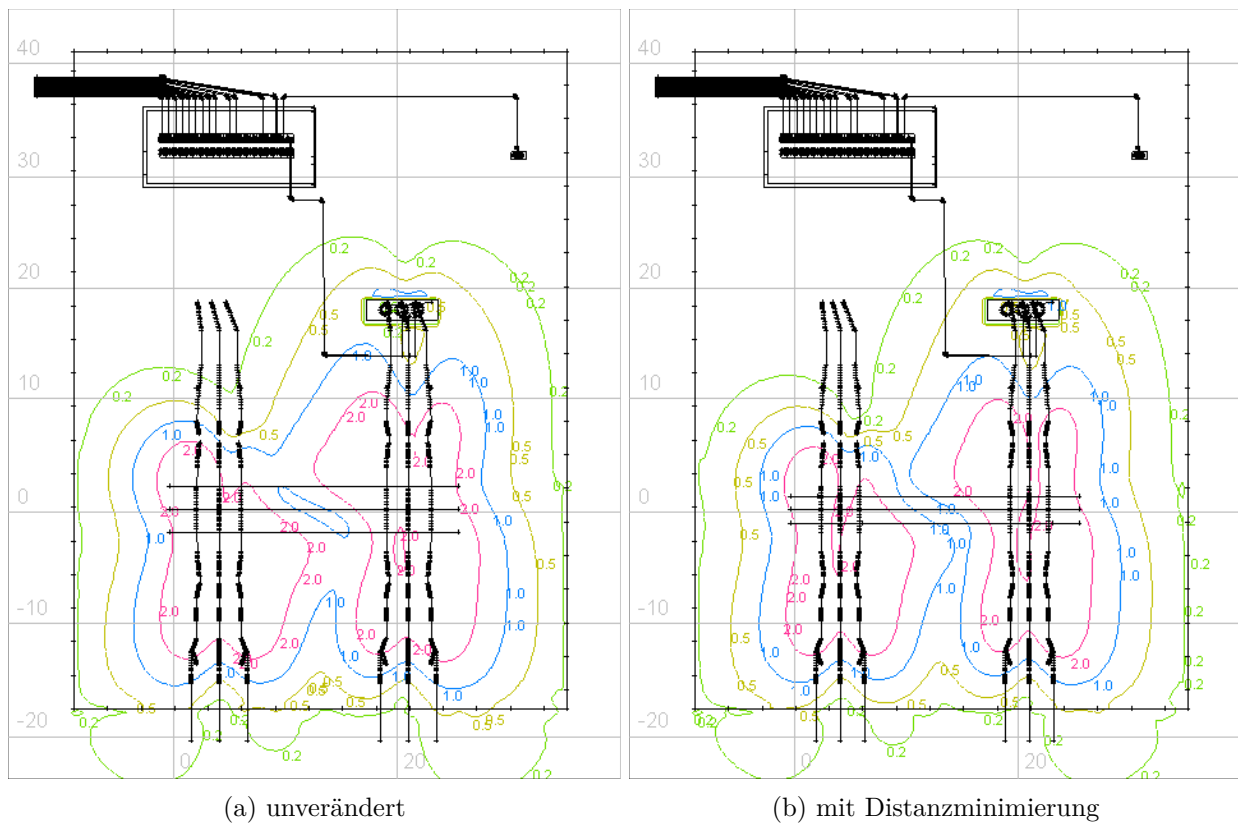


Abbildung 3.136: Feldstärkeverteilung in kV/m beim Umspannwerksmodell im Nahbereich in 1 m Höhe

abgesehen von der Schwierigkeit, in einer solchen Gegend überhaupt ein solch großes Grundstück zu erhalten. Dies gilt erst recht im Falle eines Innenraum-Umspannwerks in dicht bebautem Gebiet. Insgesamt ist festzustellen, dass die Abstandsoptimierung durch Grundstücksvergrößerung an denjenigen Orten, wo maßgebliche Minimierungsorte im Einwirkungsbereich vorhanden sind, aus Kosten- und Machbarkeitsgründen ausscheidet. Dies gilt sowohl für die Errichtung eines Umspannwerks an einem neuen Standort als auch für dessen Erneuerung auf einem vorhandenen Grundstück.

Die Anordnung der einzelnen Betriebsmittel auf dem Umspannwerksgelände ist flexibel; beispielsweise könnte im vorliegenden Beispiel des Schaltheus auch seitlich neben der 110-kV-Schaltanlage platziert werden. Diese Möglichkeit ist von Nutzen, um ein Umspannwerk auf einem vorgegebenen Grundstück unterbringen zu können. Wie aus den Abbildungen 3.137 und 3.139 zu erkennen, ist am Umspannwerkszaun auf Höhe des Schaltheuses eine geringere magnetische Flussdichte zu beobachten als auf Höhe der 110-kV-Schaltanlage, obwohl in beiden ähnliche Stromstärken fließen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die einzelnen Phasenleiter bei der 110-kV-Schaltanlage deutlich weiter voneinander entfernt sind als in der Mittelspannungs-Schaltanlage. Zudem erzeugt die Mittelspannungs-Schaltanlage, anders als ihr 110-kV-Gegenstück, bauartbedingt kein nach außen dringendes elektrisches Feld. Vor diesem Hintergrund könnte im Falle eines Umspannwerkes, das nur teilweise von maßgeblichen Minimierungsorten umgeben ist, eine Abstandsoptimierung dadurch erreicht werden, indem die 110-kV-Schaltanlage auf der von den Minimierungsorten abge-

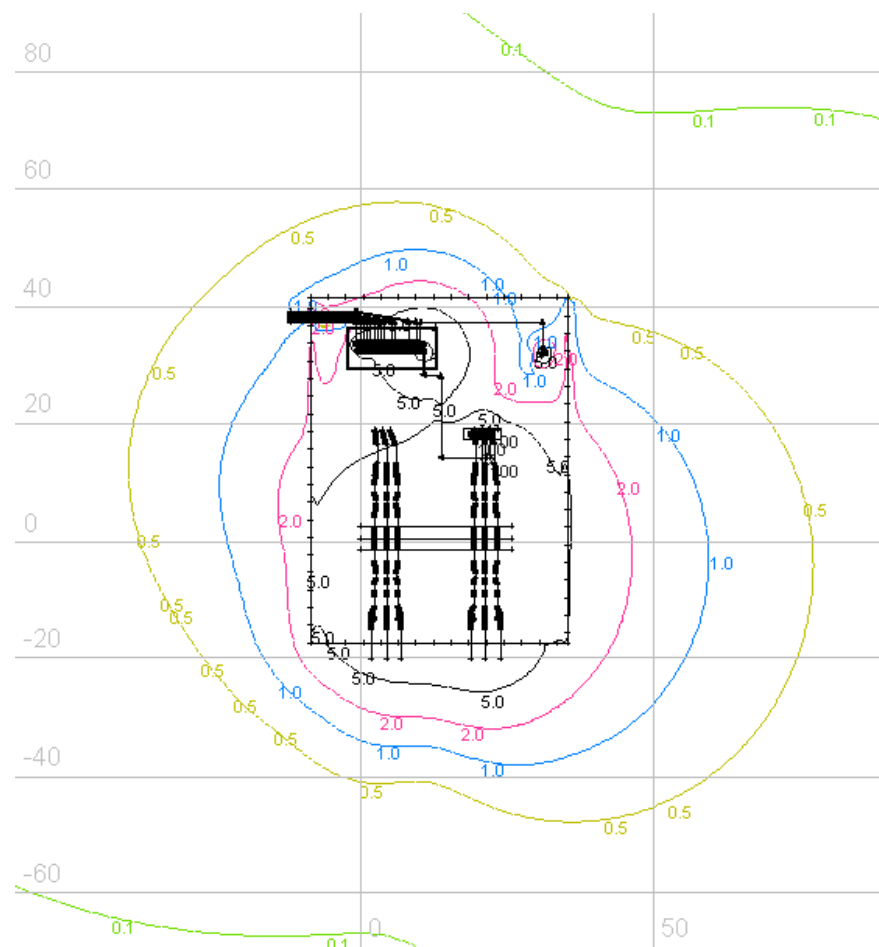


Abbildung 3.137: Flussdichteverteilung in μT beim unveränderten Umspannwerksmodell in 1 m Höhe im Einwirkungsbereich

wandten Seite des Grundstücks aufgestellt wird. Ist das Umspannwerk allseitig von maßgeblichen Minimierungsorten umgeben, scheidet diese Option aus, da die Feldverringerung an einem Minimierungsort stets mit einer Felderhöhung an einem anderen Minimierungsort verbunden wäre, was gemäß Abschnitt 3.1 der 26. BImSchVV unzulässig ist. Es ist zu berücksichtigen, dass die Freileitungsportale und damit auch die 110-kV-Schaltanlage am günstigsten auf derjenigen Seite des Umspannwerksgrundstückes aufgestellt werden, auf der das Gelände von den zuführenden 110-kV-Freileitungen erreicht wird; aus ähnlichen Gründen kann die Lage der Mittelspannungskabel außerhalb des Umspannwerksgrundstückes die günstigste Platzierung des Schalthauses vorgeben. Neben diesen Gründen kann, wie oben erwähnt, auch die Form des Grundstücks nur eine bestimmte Anordnung der Betriebsmittel zulassen; ferner müssen die Transportwege zum Umspannwerk und auf dem Umspannwerksgrundstück für Schwertransporte erreichbar sein, um die HS-/MS-Transformatoren anliefern zu können. Nicht zuletzt muss an allen Stellen im Umspannwerk ein sicherer Fluchtweg gewährleistet werden.

Während der Strom in der Mittelspannungs-Schaltanlage durch die Leistung des Transformators vorgegeben ist, ist auf 110-kV-Seite, neben der bisher betrachteten Anbindung als Einschleifung,

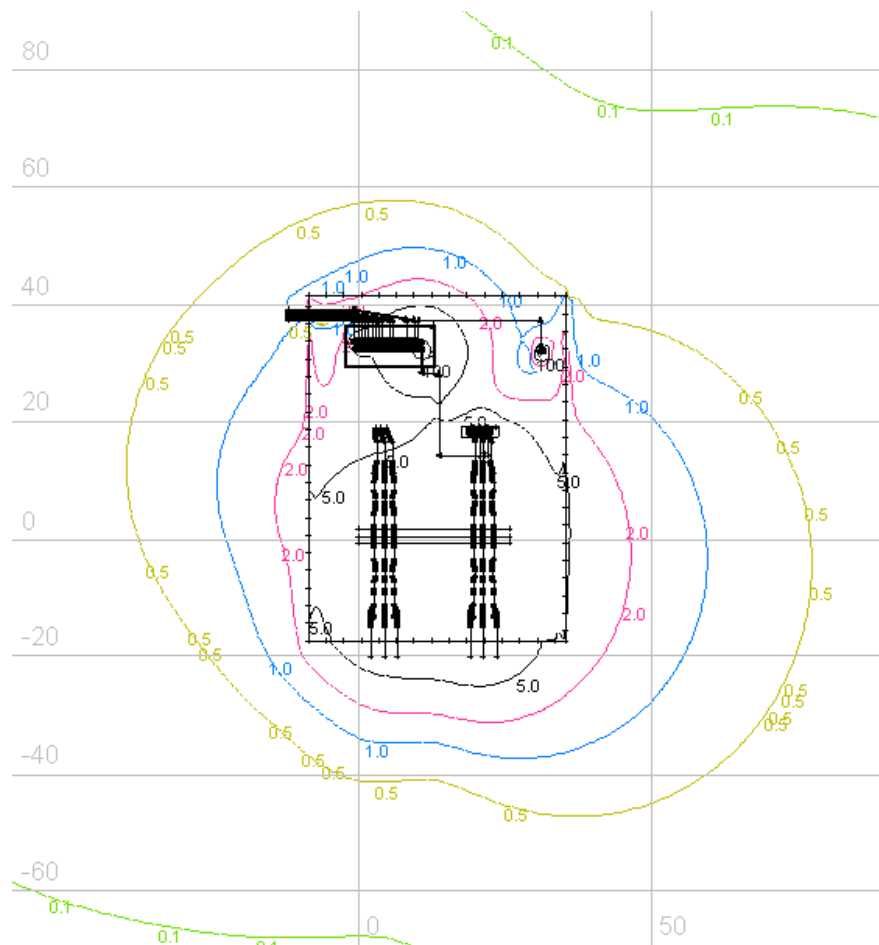


Abbildung 3.138: Flussdichteverteilung in μT beim distanzminimierten Umspannwerksmodell in 1 m Höhe im Einwirkungsbereich

auch die Anbindung des Umspannwerks als Stich an eine vorbeiführende 110-kV-Leitung denkbar. Dies führt dazu, dass in der 110-kV-Schaltanlage nur so viel Strom fließt, wie vom Transformator benötigt wird. Es soll untersucht werden, welche Folgen diese verringerte Stromstärke für die magnetische Flussdichte hat. Gemäß der Bezeichnungen in Tabelle 3.16 wird dazu für das Leitungsfeld (1), die Sammelschiene (3) und das Transformatorfeld (5) eine Stromstärke von 210 A angenommen, während das Leitungsfeld (2) und das Transformatorfeld (4) abgeschaltet sind. Die resultierenden Flussdichteverteilungen sind in Abbildung 3.141 und 3.142 dargestellt.

Im Nahbereich fällt auf, dass sich im Vergleich zur Anbindung als Einschleifung im Bereich des Schalthauses die Flussdichte nicht nennenswert ändert. Dies ist aufgrund des räumlichen Abstandes zwischen 110-kV- und Mittelspannungs-Schaltanlage nicht weiter verwunderlich. Aufseiten der 110-kV-Schaltanlage sind deutlich der fehlende Flussdichtebeitrag des abgeschalteten Leitungsfeldes und die aufgrund der geringeren Stromstärken fehlenden 50- μT -Isolinien zu erkennen. Im gesamten Einwirkungsbereich fällt im Vergleich zur Einschleifung auf, dass sich zwar die 5- μT -Isolinie überall weiter nach innen zurückzieht, während die Isolinien geringerer Flussdichte kein einheitliches Verhalten zeigen: Auf der rechten Seite ist ein deutlicher Rückgang der Flussdichte zu erkennen; auf

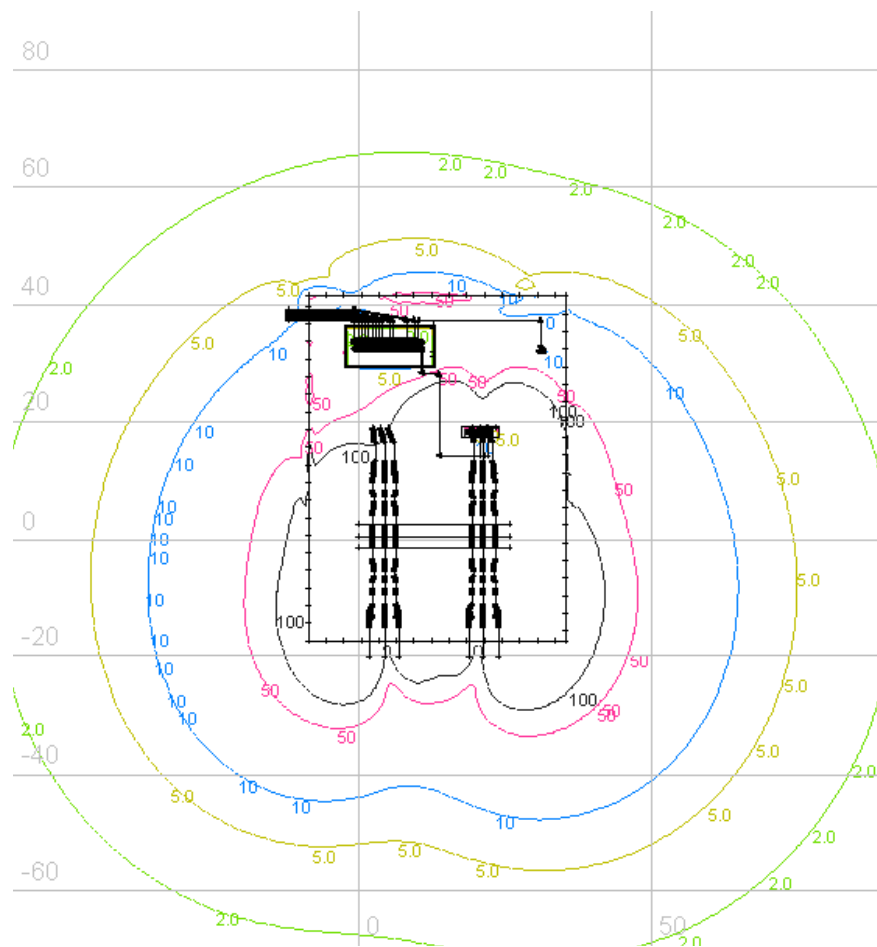


Abbildung 3.139: Feldstärkeverteilung in V/m beim unveränderten Umspannwerksmodell in 1 m Höhe im Einwirkungsbereich

den übrigen Seiten des Umspannwerks dagegen eine mehr oder weniger deutliche Erhöhung. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass beim Stich nur in einem 110-kV-Leitungsfeld Strom fließt und dadurch, im Vergleich zur Einschleifung, eine mögliche gegenseitige Kompensation der Flussdichten der beiden Leitungsfelder wegfällt.

Betrachtet man die 1,0- und die 0,5- μ T-Linien, so fällt auf, dass diese auch bei der Anbindung des Umspannwerkes im Stich aufseiten der 110-kV-Schaltanlage eine größere Entfernung vom Zaun aufweisen als aufseiten des Mittelspannungs-Schalthauses; der Flussdichtebeitrag der 110-kV-Schaltanlage überwiegt also trotz der geringeren darin vorherrschenden Stromstärken. Die oben angestellten Überlegungen zur Abstandsoptimierung durch andere Anordnung der Betriebsmittel auf dem Gelände sind also auch in diesem Fall gültig. Wenn aber beispielsweise die Mittelspannungsseite des Umspannwerkes mit 10 kV Nennspannung und damit, bei gleicher Transformatorleistung, mit doppelt so hohem Nennstrom betrieben wird, könnten die Flussdichtebeiträge des Hoch- und des Mittelspannungsteils in vergleichbarer Größenordnung liegen oder gar das umgekehrte Verhältnis aufweisen.

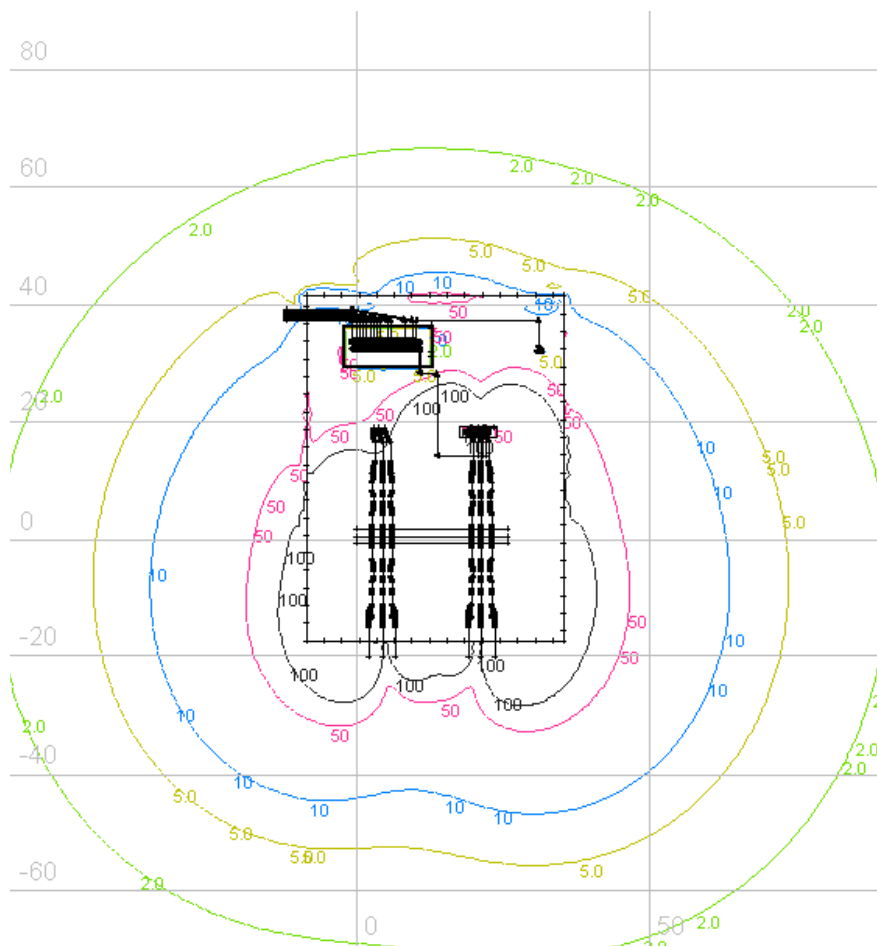


Abbildung 3.140: Feldstärkeverteilung in V/m beim distanzminimierten Umspannwerksmodell in 1 m Höhe im Einwirkungsbereich

Während im ersteren Fall die oben beschriebene Abstandsoptimierung durch Vertauschung von Hoch- und Mittelspannungsteil am maßgeblichen Minimierungsort zwar keine Verringerung der einwirkenden magnetischen Flussdichte, aber immerhin noch der elektrischen Feldstärke bewirken würde, wäre im letzteren Fall eine Erhöhung der magnetischen Flussdichte bei einer Verringerung der elektrischen Feldstärke zu erwarten. Die 26. BImSchVVwV legt in ihrem Abschnitt 3.1 fest, dass bei Niederfrequenzanlagen die Minimierung des magnetischen Feldes zu bevorzugen ist (siehe Abschnitt 2.7.2), sodass angenommen werden könnte, dass eine Verringerung der magnetischen Flussdichte bei steigender elektrischer Feldstärke immer noch als Minimierung anzusehen wäre. Da aber im gleichen Abschnitt der 26. BImSchVVwV auch festgelegt wird, dass kein maßgeblicher Minimierungsort durch die Minimierung höhere Immissionen erhalten darf, wäre es unzulässig, die magnetische Flussdichte auf Kosten einer Erhöhung der elektrischen Feldstärke zu minimieren. In diesem Fall ist damit keine Minimierung durch Austausch von Hoch- und Mittelspannungsteil auf dem Umspannwerksgrundstück möglich.

Ähnliche Überlegungen lassen sich auch für Innenraum-Umspannwerke anstellen, wobei hier das elektrische Feld außer Acht bleiben kann. Nachdem sich Mittelspannungs- und 110-kV-Schaltanlage

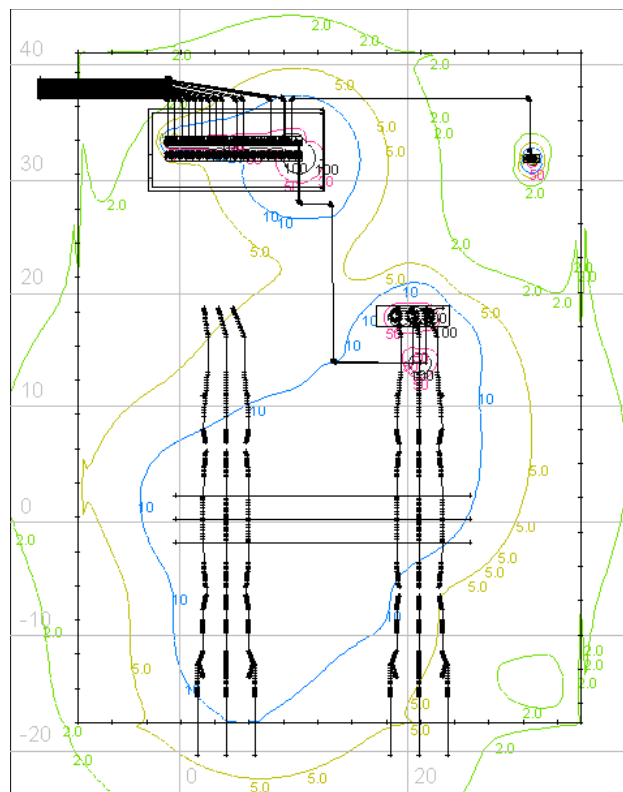


Abbildung 3.141: Flussdichteverteilung in μT beim Umspannwerksmodell mit Anbindung im Stich im Nahbereich in 1 m Höhe

gen in gasisolierter Ausführung hinsichtlich der mechanischen Abstände der Phasenleiter ähneln, ist auch zu erwarten, dass sie bei gleicher Stromstärke ähnliche Flussdichteverteilungen aufweisen. Solange wie im obigen Beispiel der 110-kV-Stich-Anbindung auf Mittelspannungsseite höhere Stromstärken vorherrschen als auf der 110-kV-Seite, wäre grundsätzlich eine Abstandsoptimierung durch Veränderung der Anordnung von Hoch- und Mittelspannungsteil innerhalb des Gebäudes denkbar. Abgesehen davon, dass in der räumlichen Enge innerstädtischer Bebauung eine bestimmte Raumaufteilung beispielsweise aus Gründen der Erreichbarkeit der Transformatoren von der Straßenseite her und aufgrund der Lage der Kabel oftmals zwingend ist, würde eine solche Minimierung aufgrund von Abschnitt 3.1 der 26. BImSchVVwV ausscheiden: Im innerstädtischen Bereich ist stets anzunehmen, dass sich innerhalb des Einwirkungsbereiches von 50 m um das Umspannwerk herum in jeder Richtung eine beträchtliche Zahl maßgeblicher Minimierungsorte befindet, von denen keiner durch die Minimierungsmaßnahme eine höhere magnetische Flussdichte erhalten darf. Ähnliches gilt bei mehrstöckigen Innenraum-Umspannwerken hinsichtlich der Aufteilung der Geschosse auf die Spannungsebenen.

Bei gegebener Anordnung der Anlagen auf dem Umspannwerksgelände könnte ferner eine Abstandsoptimierung durch eine andere Verlegung der Kabel erreicht werden. Im vorliegenden Beispiel wäre es grundsätzlich möglich, die vom Schalthaus abgehenden Mittelspannungskabel statt auf der oberen auf der unteren Seite des Schalthauses und damit auf der von der Grundstücksgrenze abgewandten Seite zu verlegen. Dies hätte allerdings zur Folge, dass es zu Überkreuzungen zwischen

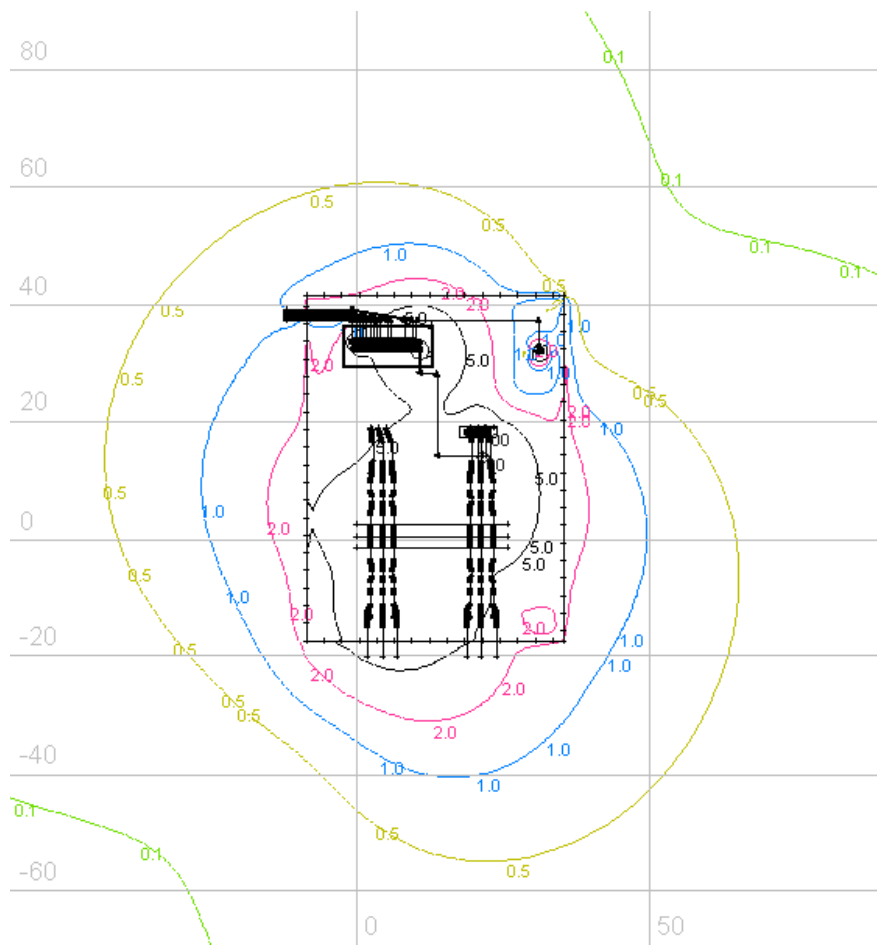


Abbildung 3.142: Flussdichteverteilung in μT Umspannungsmodell mit Anbindung im Stich in 1 m Höhe im Einwirkungsbereich

den erwähnten Mittelspannungskabeln und anderen, im Umspannungswerksgelände verlegten Kabeln käme, was aus Gründen der Wartbarkeit und der Versorgungszuverlässigkeit zu vermeiden ist.

Schließlich wäre eine Abstandsoptimierung innerhalb des Schalthauses denkbar: Im vorliegenden Beispiel sind die Mittelspannungs-Schaltfelder Rücken an Rücken in der Mitte des Schalthauses aufgestellt (siehe Abbildung 3.134). Dies ist technisch vorteilhaft, da jeweils gegenüberliegende Schaltfelder denselben Mittelspannungs-Abgang bedienen, stellt aber zugleich eine Abstandsoptimierung dar: die Alternative bestünde nämlich darin, die Schaltfelder an der Außenwand des Schalthauses zu platzieren, was einen geringeren Abstand zwischen dem Zaun und der oberen Reihe an Schaltfeldern zur Folge hätte. Allerdings gibt es auch technische Gründe, die für die Aufstellung der Schaltfelder an der Außenwand sprechen, beispielsweise die bessere Raumausnutzung: Im Falle der Aufstellung der Schaltfelder in der Mitte des Schalthauses muss auf beiden Seiten ein ausreichender Abstand zur Außenwand freigehalten werden, um eine sichere Bedienbarkeit und auch den Aus- und Einbau sowie den Transport eines Schaltfeldes innerhalb der Breite des Ganges zu gewährleisten. Werden die Schaltfelder dagegen an der Außenwand aufgestellt, so muss ein Gang dieser Breite nur einmal, nämlich in der Mitte des Raumes, freigehalten werden, was eine Platz-

und damit eine Kostenersparnis mit sich bringt. Ferner kann eine Anordnung an der Außenwand aus Arbeitsschutzgründen zwingend sein, nämlich dann, wenn Mittelspannungs-Schaltfelder verwendet werden, bei denen im Kurzschlussfall eine Druckentlastung nach hinten erfolgt. Würden derartige Schaltfelder in der Mitte des Schalthauses aufgestellt, wäre ein möglicherweise vor dem gegenüberliegenden Schaltfeld stehender Bediener im Falle eines Kurzschlusses gefährdet.

3.4.3 Schlussfolgerungen

In den vorstehenden Abschnitten wurde gezeigt, dass eine Minimierung der Distanzen zwischen Betriebsmitteln mit unterschiedlicher Phasenbelegung nur bei 110-kV-Freiluft-Schaltanlagen durchgeführt werden kann. Dort bringt sie eine geringe Minderung der elektrischen Feldstärken und magnetischen Flussdichten außerhalb des Umspannwerksgeländes mit sich, ist allerdings auch mit technischen Nachteilen behaftet und erscheint daher eher unverhältnismäßig. Eine Abstandsoptimierung ist, abhängig von der Art der hochspannungsseitigen Anbindung und von der verwendeten Mittelspannungsebene, unter Umständen wirksam, scheidet aber in vielen Fällen dadurch aus, dass der zur Verfügung stehende Platz begrenzt oder die Positionierung der einzelnen Anlagen im Umspannwerk aus technischen Gründen vorgegeben ist. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass kein maßgeblicher Minimierungsort durch diese Maßnahme höheren Flussdichten oder Feldstärken ausgesetzt werden darf, sodass die Abstandsoptimierung nur bei solchen Umspannwerken angewendet werden kann, bei denen sich mindestens an einer Außenseite keine maßgeblichen Minimierungsorte befinden. Innerhalb eines Schalthauses kann die Abstandsoptimierung durch Platzierung der Schaltfelder in der Mitte des Raumes ausgeführt werden, sofern die technischen Rahmenbedingungen und die Platzverhältnisse dies zulassen.

4 Sonstige Minimierungsmaßnahmen

Neben den in der 26. BImSchVVwV vorgesehen Minimierungsmaßnahmen sind noch weitere Möglichkeiten denkbar, die von Anlagen des Verteilnetzes ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder zu reduzieren. Einige davon sollen in den folgenden Abschnitten auf ihre Wirksamkeit und auf ihre praktische Durchführbarkeit hin untersucht werden.

4.1 Verlegung von Kabeln in Metallrohren

In Abschnitt 2.3 ist dargestellt, dass ein Metallrohr durch den Effekt von Induktion und Gegeninduktion die magnetische Flussdichte verringern kann, die von einem in seinem inneren liegenden Kabel ausgeht. Die damit erzielbare Schirmwirkung soll zuerst rechnerisch und anschließend messtechnisch bewertet werden. Aus Gleichung 2.22 ist zu erkennen, dass bei einem supraleitenden Rohrwerkstoff ($\sigma \rightarrow \infty$) die Eindringtiefe gegen Null und die Schirmwirkung folglich gegen Unendlich gehen würde. Dies stellt aber allenfalls eine theoretische Möglichkeit zur Schirmung dar, da supraleitende Werkstoffe dauernd auf sehr niedrigen Temperaturen gehalten werden müssen, um supraleitend zu bleiben. Die Kühlung eines mehrere Kilometer langen, im Erdboden liegenden Rohres würde einen ungeheuren Aufwand an Energie und Material erfordern. Es sollen daher nur der im Rohrleitungsbereich bewährte Baustoff Stahl und, zum Vergleich, Aluminium betrachtet werden.

4.1.1 Rechnerische Betrachtung

Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Programm WinField ist nicht in der Lage, ein Stahlrohr zu modellieren. Ein solches kann nur durch vier einzelne Leiter angenähert werden, die anstelle des Mantels des Stahlrohres platziert werden. Die vier Leiter müssen dabei gleichmäßig auf den Umfang des Stahlrohres verteilt werden; dazu muss jeder einzelne Leiter ein Viertel des Rohrquerschnitts aufweisen und als Erdseil definiert werden. Außerdem müssen in den erweiterten Einstellungen von Winfield die automatischen Induktionsströme aktiviert werden⁹.

Unter gewissen Voraussetzungen ist aber auch eine näherungsweise analytische Berechnung der Abschirmwirkung eines Stahlrohres möglich. Bedingung hierfür ist, dass die Entfernung des Punktes, an dem die magnetische Flussdichte betrachtet wird, zum Rohr deutlich größer ist als der Abstand zwischen dem Mittelpunkt des Rohres und den Phasenleitern. Die Schirmwirkung S wird in Anlehnung an die Veröffentlichung von Du und Burnett festgelegt als Verhältnis zwischen der

⁹Herstellerinformation vom 20. April 2018.

magnetischen Flussdichte mit und ohne Abschirmung an einem bestimmten Punkt außerhalb des Rohres, der obiger Bedingung genügt [35].

$$S = \frac{B_{\text{mit Abschirmung}}}{B_{\text{ohne Abschirmung}}} \quad (4.1)$$

Unter diesen Voraussetzungen kann S mithilfe einer nach dem ersten Glied abgebrochenen Reihenentwicklung näherungsweise bestimmt werden. Dabei hängt S alleine von den Eigenschaften des abschirmenden Rohres ab und nicht von der Beschaffenheit der felderzeugenden Leiter oder vom Abstand des betrachteten Punktes. Man erhält den in Gleichung 4.2 dargestellten Zusammenhang, der sowohl für ein- als auch für dreiphasige Leiteranordnungen gültig ist. Ein für drei beispielhafte Werkstoffe durchgeführter Vergleich zwischen exaktem Ergebnis und Annäherung ergab in jedem Fall einen Fehler von weniger als 13% [35].

$$S \approx \frac{\sqrt{2}R_2}{|(1 - j0,5R_2^2) \sinh(R_1 + jR_1) + (1 - j)R_2 \cosh(R_1 + jR_1)|} \quad (4.2)$$

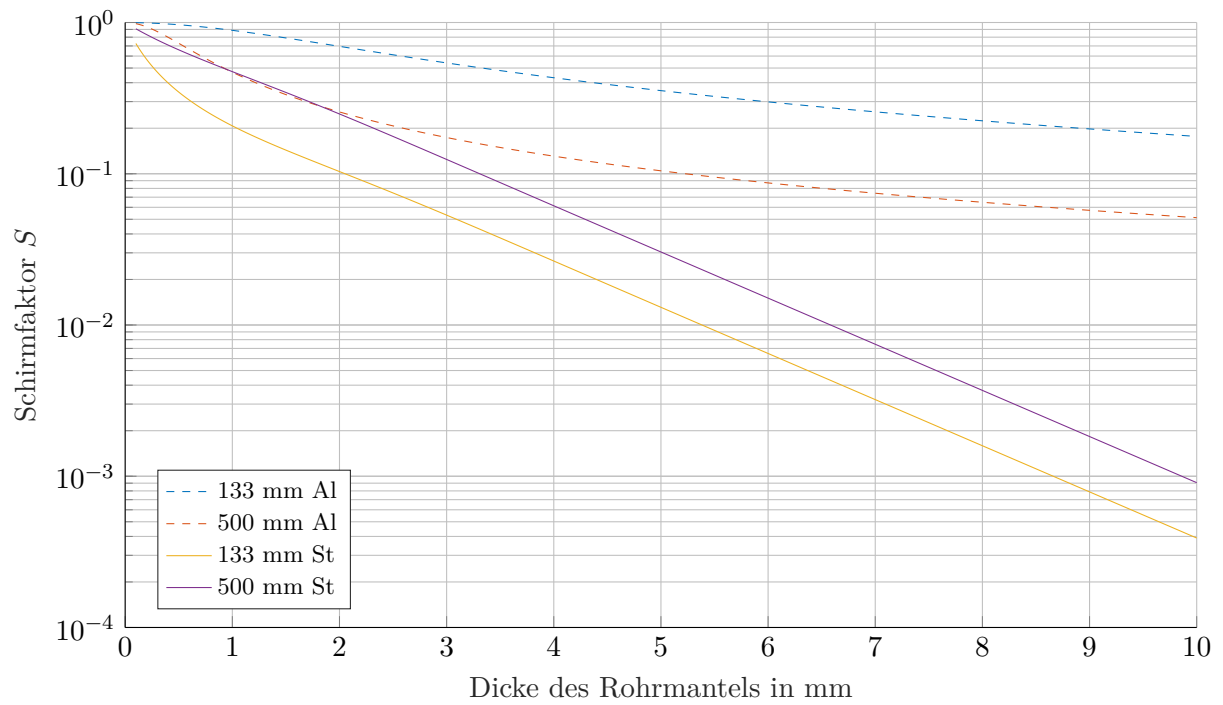
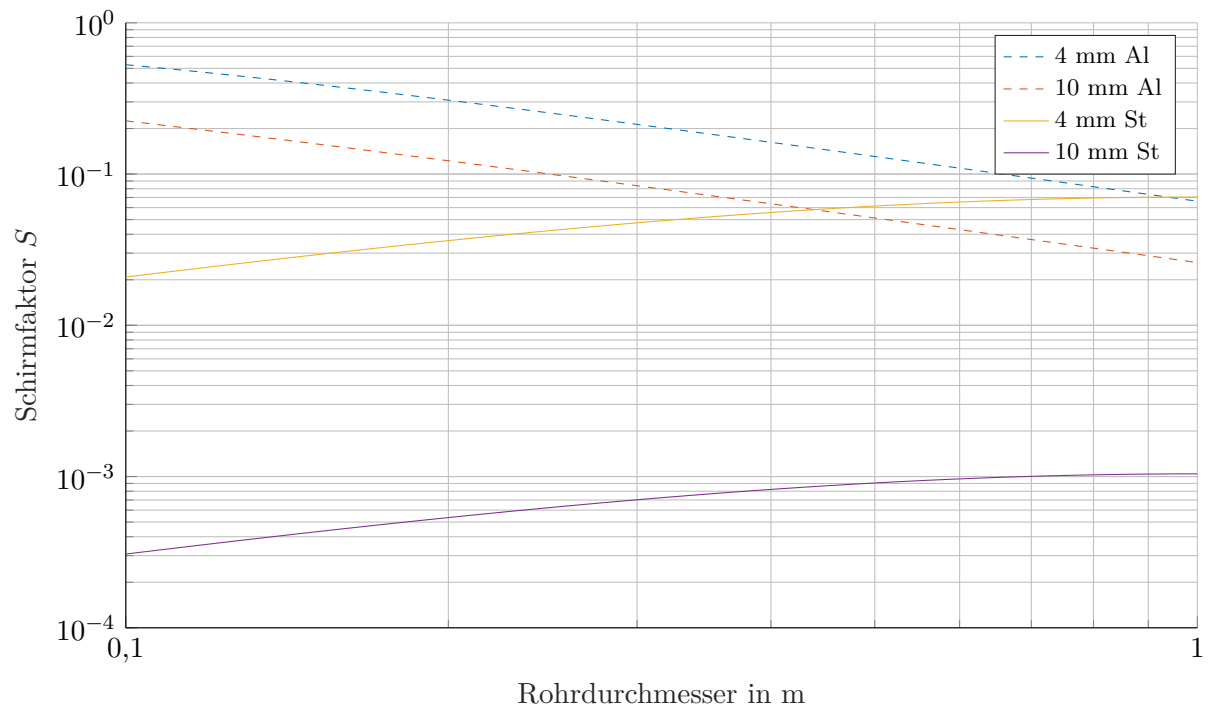
Die beiden Variablen R_1 und R_2 werden nach folgenden Formeln berechnet. δ stellt dabei die Skintiefe des Rohrwerkstoffes dar (siehe Gleichung 2.22). t_1 bezeichnet die Wandstärke und r_2 den Außenradius des Rohres.

$$R_1 = \frac{t_1}{\delta} \quad (4.3)$$

$$R_2 = \frac{\mu_r \delta}{r_2} \quad (4.4)$$

Aus Gleichung 4.2 ist nicht direkt ersichtlich, ob S mit Veränderung der einzelnen Parameter zu- oder abnimmt. Es soll daher für ausgewählte Rohrgeometrien S unter Veränderung der Wandstärke und des Rohrdurchmessers bei $f = 50$ Hz Netzfrequenz berechnet werden. Dabei wird von zwei verschiedenen Rohrgeometrien ausgegangen: zum einen ein kleineres Rohr mit 133 mm Außendurchmesser und 4 mm Wandstärke und zum anderen ein größeres Rohr mit 500 mm Außendurchmesser und 10 mm Wandstärke. Als Rohrwerkstoffe sollen Stahl und Aluminium betrachtet werden. Da eine große Vielfalt an Stahlsorten mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften existiert, sollen hier pauschal eine relative Permeabilität von $\mu_r = 500$ und eine elektrische Leitfähigkeit von $5 \cdot 10^6$ 1/Ωm verwendet werden; im Falle von Aluminium gilt $\mu_r = 1$ und $\sigma = 3,8 \cdot 10^7$ 1/Ωm. Es ergeben sich Skintiefen von 1,42 mm für den betrachteten Stahlwerkstoff und von 11,5 mm für den Aluminiumwerkstoff, was vermuten lässt, dass ein Stahlrohr bei ansonsten gleichen Parametern eine stärkere Schirmwirkung aufweist als eines aus Aluminium.

In Abbildung 4.1 ist S bei gleichbleibendem Durchmesser und veränderter Wandstärke des Rohres dargestellt. Durch die Geraden in der logarithmischen Darstellung ist zu erkennen, dass im Falle der Stahlrohre eine exponentielle Abhängigkeit zwischen Wandstärke und Schirmwirkung besteht. Eine Ausnahme hierzu stellt lediglich der Bereich zwischen 0,1 und 1 mm dar, und dies auch nur beim Rohr mit 133 mm Außendurchmesser. Besteht das Rohr hingegen aus Aluminium, so wird eine deutlich geringere Schirmwirkung erzielt, die mit zunehmender Wandstärke deutlich langsamer ansteigt als im Falle der Stahlrohre.

Abbildung 4.1: S in Abhängigkeit von der Wandstärke bei gegebenem RohrdurchmesserAbbildung 4.2: S in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser bei gegebener Wandstärke

In Abbildung 4.2 ist S in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser bei gleichbleibender Wandstärke aufgetragen. Hier zeigt sich, dass bei den Aluminiumrohren die Schirmwirkung mit zunehmendem Durchmesser zu- und bei den Stahlrohren mit zunehmendem Durchmesser abnimmt. In der doppeltlogarithmischen Darstellung erinnern die Kurvenverläufe an Geraden, was vermuten lässt, dass S und Durchmesser d in einem, wenngleich mäßig ausgeprägten, Potenzverhältnis der Art $S = C \cdot d^a$ stehen. C und a stellen dabei nicht näher bestimmte Konstanten dar.

4.1.2 Messtechnische Überprüfung

Von der Bayernwerk Netz GmbH, Regensburg, wurde eine Magnetfeldmessung mit einem kalibrierten Messgerät vom Typ Narda EFA-3 an einem stellenweise zum mechanischen Schutz in einem Stahlrohr verlegten 30-kV-Kabel durchgeführt [36]. Da die elektrische Feldstärke bei Kabeln keine Rolle spielt, sind die Ergebnisse auf die 110-kV-Spannungsebene übertragbar. In Abbildung 4.3 ist die Anordnung von Kabel und Messpunkten mit Messergebnissen dargestellt. Die Unterseite des Stahlrohres befindet sich in 1,2 m Tiefe unter der Erdbodenoberkante. Aufgrund der einsystemigen Anordnung spielt die Phasenordnung keine Rolle. Es wurde die magnetische Flussdichte in mehreren Höhen unmittelbar über dem Kabel sowie in einer Höhe von einem Meter mit unterschiedlichen seitlichen Abständen zur Trassenachse gemessen. Diese Messung wurde für dieselben Messpunkte an einer Stelle wiederholt, an der das 30-kV-Kabel das Rohr wieder verlassen hatte und ungeschützt in der Erde lag. Der Strom durch das Kabel lag bei der Messung mit Rohr bei 92,3 A und bei der Messung ohne Rohr bei 92,0 A, was einen vernachlässigbar kleinen Unterschied darstellt. Alle übrigen Parameter blieben unverändert.

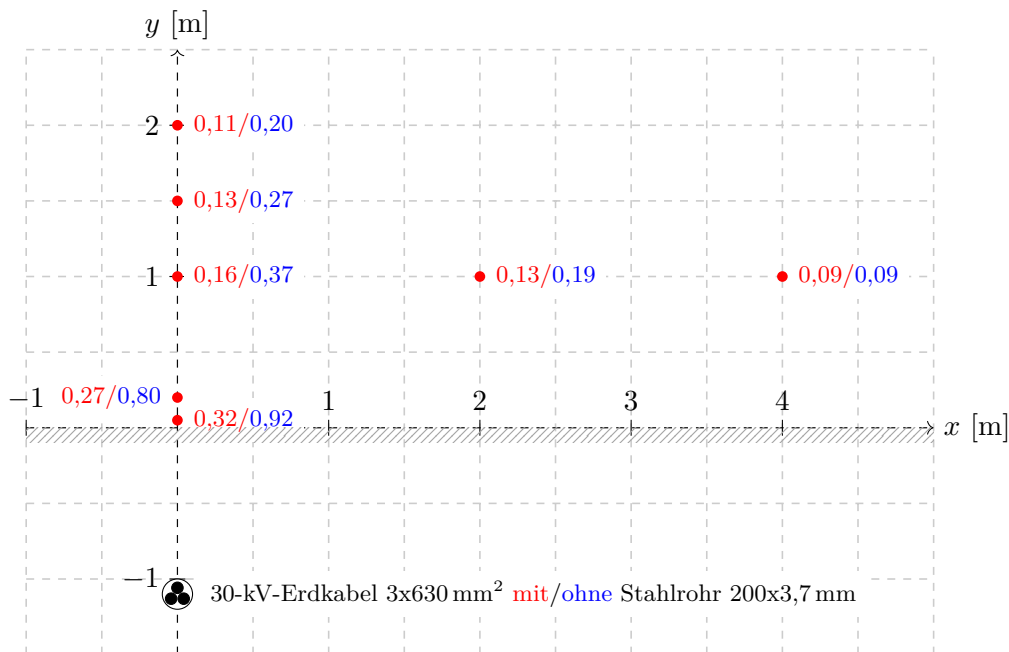


Abbildung 4.3: Gemessene magnet. Flussdichte in pT am 30-kV-Kabel mit und ohne Stahlrohr

Es ist zu erkennen, dass der Schirmfaktor S (siehe Gleichung 4.1) in 5 cm Höhe über der Erdbodenoberkante 0,35 beträgt. Mit zunehmendem Abstand verringert sich die Schirmwirkung: In

1 m Höhe liegt S noch bei 0,43 und in 2 m Höhe bei 0,55. In 1 m Höhe bei 2 m seitlichem Abstand beträgt S schließlich 0,68. In 4 m seitlichem Abstand wurden sowohl mit als auch ohne Rohr 0,09 μT gemessen. Die Abnahme der Schirmwirkung mit zunehmendem Abstand vom Kabel steht im Widerspruch zur Aussage von Du und Burnett, wonach der Schirmfaktor unabhängig vom Messpunkt sei, solange der Abstand zwischen Kabel und Messpunkt deutlich größer ist als der Abstand zwischen Rohrmittelpunkt und Kabel [35]. Eine Erklärung für diese Beobachtung könnte in einer möglichen Einwirkung der magnetischen Flussdichte einer anderen Quelle und damit in einer Verfälschung der Messergebnisse bei niedrigen absoluten Flussdichte-Werten liegen. Vor diesem Hintergrund wird dem bei höheren absoluten Flussdichte-Werten unmittelbar über der Erdbodenoberkante ermittelten Schirmfaktor von 0,35 die größte Aussagekraft beigemessen.

In Abbildung 4.2 kann für ein Stahlrohr mit 4 mm Wandstärke und 0,2 m Durchmesser ein Schirmfaktor von ca. $1/70$, entsprechend 0,014, abgelesen werden. Dieser Wert weicht deutlich vom messtechnisch ermittelten Schirmfaktor 0,35 ab. Da die mechanischen Eigenschaften des Stahlrohrs genau bekannt sind und nur geringen Schwankungen unterliegen, könnte die Abweichung dadurch zu erklären sein, dass die relative Permeabilität μ_r und die elektrische Leitfähigkeit σ des Stahlrohres in der Praxis deutlich geringer sind als im obigen Abschnitt angenommen (was sich der nachträglichen Überprüfung entzieht).

Die Verlegung eines Kabels im Stahlrohr hat neben den höheren Kosten bei Beschaffung und Verlegung auch den Nachteil, dass das Kabel zur eventuellen Störungsbehebung schwieriger erreichbar ist, was wiederum höhere Kosten sowie eine geringere Versorgungszuverlässigkeit zur Folge hat. Im Lichte der relativ geringen damit zu erzielenden Schirmwirkung scheint diese Minimierungsmaßnahme unverhältnismäßig und damit zu Recht nicht in die 26. BImSchVVwV aufgenommen.

4.2 Magnetische Schirmplatten

Nach dem erstmaligen Inkrafttreten der 26. BImSchV kamen in denjenigen Fällen, in denen eine bestehende Ortsnetzstation durch ungünstige Anordnung der Niederspannungsverteilung auf der Innenseite einer Außenwand den Grenzwert für die magnetische Flussdichte bei höchster Auslastung überschritt, Abschirmplatten zur Sicherstellung der Grenzwerteinhaltung zum Einsatz. Es handelt sich bei diesen Platten um eine wenige Millimeter dicke Sandwichanordnung aus Aluminiumschichten und Schichten aus einem Werkstoff mit hoher relativer magnetischer Permeabilität. Damit werden die ferromagnetische Abschirmung und die Abschirmung durch Induktion und Gegeninduktion kombiniert. Diese Platten wurden zwischen Wand und Niederspannungsverteilung bzw. zwischen Wand und Niederspannungskabeln angebracht.

Die Bayernwerk Netz GmbH, Regensburg, hat bei einer Bestandsstation, deren Niederspannungsverteilung in 8 cm Abstand von der ebenfalls 8 cm starken Außenwand angebracht ist, eine solche Nachrüstung durchgeführt. Es wurden Schirmplatten mit 2 mm Dicke, bestehend aus Aluminiumschichten und Schichten einer Silizium-Eisenlegierung, verwendet, die an der Innenseite der Außenwand auf der gesamten von der Niederspannungsverteilung bedeckten Fläche angebracht wurden. Auf der Außenseite derselben Wand wurden Messungen der magnetischen Flussdichte vor und nach Anbringung der Schirmplatten durchgeführt, wobei die übrigen Parameter der Station un-

verändert blieben. Die Stromstärken der einzelnen Phasen vor und nach Einbau der Schirmplatten unterschieden sich um höchstens 7%. Gemessen wurde in einem 50-cm-Raster über die Fläche der Niederspannungsverteilung hinweg sowohl unmittelbar an der Wand als auch in 20 cm Abstand von derselben [37].

Über alle Messpunkte hinweg bewegte sich der aus den Messwerten errechnete Schirmfaktor zwischen 0,56 und 0,11, wobei die stärkere Schirmwirkung an Orten mit höheren absoluten Flussdichtewerten ermittelt wurde. Dies legt die Vermutung nahe, dass die geringeren festgestellten Schirmwirkungen bei niedrigeren absoluten Flussdichtewerte möglicherweise durch Flussdichteeinträge anderer Komponenten der Station verfälscht sein könnten, die natürlicherweise bei niedrigen absoluten Messwerten stärker ins Gewicht fallen als bei höheren. In den meisten Fällen war unmittelbar an der Außenwand eine stärkere Schirmwirkung zu beobachten als in 20 cm Abstand, wobei an mehreren Stellen ein umgekehrter Zusammenhang bestand. Berücksichtigt man eine mögliche Messunsicherheit sowie die geringfügige Schwankung der Stromstärke in der Niederspannungsverteilung vor und nach dem Einbau der Schirmplatten, kann insgesamt ein Schirmfaktor der beschriebenen Schirmplatten im Bereich von etwa 0,1 bis 0,3 festgestellt werden.

Angesichts eines solchen Schirmfaktors steht die Frage im Raum, wieso nicht alle neu gebauten oder wesentlich geänderten Ortsnetzstationen mit Schirmplatten ausgestattet werden. Dazu muss zuerst angemerkt werden, dass die Schirmplatten kostspielig in der Anschaffung und aufwendig in der Montage sind, wenn auch durch ihren massenhaften Einsatz eine gewisse Ersparnis erwartet werden könnte. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass Ortsnetzstationen in aller Regel deutlich geringere Abmessungen als die gegebenenfalls angrenzenden maßgeblichen Minimierungsorte aufweisen. Ein maßgeblicher Minimierungsort ist in Abschnitt 2.11 der 26. BImSchVVwV definiert als *„im Einwirkungsbereich der jeweiligen Anlage liegendes Gebäude oder Grundstück im Sinne des § 4 Absatz 1 26. BImSchV sowie jedes Gebäude oder Gebäudeteil, das zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt ist“*.

Beindet sich ein maßgeblicher Minimierungsort innerhalb des von der 26. BImSchVVwV festgelegten Bewertungsabstandes, der für Ortsnetzstationen 1 m ab der Einhausung beträgt, ist die Feldminimierung sowohl im Freien wie auch in Gebäuden in der Mitte des maßgeblichen Minimierungsortes zu prüfen. Hat der maßgebliche Minimierungsort eine größere Entfernung von der Station, so ist die Minimierungsprüfung am sogenannten Bezugspunkt im Bewertungsabstand von der Station auf der gedachten Verbindungslinie zwischen dem Mittelpunkt der Station und dem maßgeblichen Minimierungsort zu prüfen (Abschnitt 4 der 26. BImSchVVwV).

Es ist, wie oben erwähnt, aufgrund der vergleichsweise geringen Gebäudeabmessungen insbesondere bei Kompaktstationen anzunehmen, dass an eine Ortsnetzstation angrenzende Gebäude und Grundstücke eine wesentlich größere Ausdehnung haben als die Station selbst. Dies führt dazu, dass, wenn ein solcher Minimierungsort unmittelbar an die Station angrenzt, dessen Mittelpunkt weiter als 1 m von der Station entfernt liegt. Zusammen mit der Festlegung der 26. BImSchVVwV für weiter entfernt liegende Minimierungsorte ist damit anzunehmen, dass die Minimierungsprüfung in praktisch keinem Fall in einer geringeren Entfernung als 1 m von der Station auszuführen ist. In Abbildung 3.122 ist zu erkennen, dass die magnetische Flussdichte beim Stationstyp 2817 in 1 m Entfernung von der Außenseite der Gebäudehülle fast überall unterhalb von 5 μ T liegt. In Anbetracht dieser niedrigen absoluten Werte erscheint die Verhältnismäßigkeit einer zusätzlichen, kostenträchtigen

Minimierungsmaßnahme fraglich. Beim Stationstyp 4227 herrschen in einer Entfernung von 1 m von der Gebäudehülle teilweise Flussdichten von mehr als 10 μT (siehe Abbildung 3.127). Allerdings finden sich solch stark bestückte Ortsnetzstationen fast ausschließlich in Gewerbegebieten, wo sich eine Minimierung zumeist aus Mangel an maßgeblichen Minimierungsorten erübrigt. Eine geschirmte Sonderbauform dieses Typs nur für die wenigen Ausnahmefälle vorzuhalten, scheidet aus Verhältnismäßigkeitsgründen aus.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Schirmplatten aufgrund der beschriebenen Unverhältnismäßigkeit ihrer Kosten und ihres Nutzens zu Recht keine Minimierungsmaßnahme im Sinne der 26. BImSchVV darstellen. Die der 26. BImSchVV beigefügte Begründung schreibt dazu: *„Die Maßnahme der magnetischen Schirmung ist in Nummer 5 nicht erfasst. Sie ist zwar theoretisch möglich, indem Schirmflächen zwischen den stromführenden Leitungssystemen und den maßgeblichen Minimierungsorten eingefügt werden. Diese zusätzliche Verwendung magnetischer Schirmungsmaterialien kann die Ausführung der Anlage sowohl technisch als auch baulich stark beeinflussen. [...] Sie entspricht deshalb nicht dem derzeitigen Stand der Technik“.*

4.3 Aktive und passive Kompensationsleiter

Die Wirkungsweise der Abschirmung niederfrequenter magnetischer Felder durch Induktion und Gegeninduktion in weiteren (passiven) Leitern wurde bereits am Beispiel der Mitführung zusätzlicher Erdseile an Freileitungen untersucht (siehe Abschnitt 3.1.3), wobei eine gewisse Verringerung der Flussdichte durch die mitgeführten Erdseile festgestellt wurde. Dieselbe Vorgehensweise wäre grundsätzlich auch bei Erdkabeln denkbar, wobei die Erdleiter hier oberhalb der Kabel verlegt werden müssten. Die praktische Realisierbarkeit einer solchen Lösung ist allerdings als gering einzuschätzen, da an denjenigen Orten, an denen maßgebliche Minimierungsorte nahe an Erdkabeltrassen anschließen, in aller Regel aufgrund der zahlreichen anderen vorhandenen Kabel und Leitungen kein Platz für zusätzliche Kompensationsleiter oberhalb der Mittel- bzw. Hochspannungskabel bleiben wird.

Neben der Abschirmung durch passive Erdleiter ist auch eine aktive Kompensation von Magnetfeldern denkbar, indem versucht wird, in zusätzlich zu den zur Energieübertragung verlegten Kabeln Ströme derart hinsichtlich Phase und Stromstärke fließen zu lassen, dass sich die Flussdichten der Energieübertragungskabel und der Kompensationsleiter gegenseitig bestmöglich auslöschen. Damit ist eine deutlich stärkere Verringerung der Flussdichte erreichbar als mit passiven Kompensationsleitern [38]. Zur Anwendung dieser Minimierungsmethode ist zusätzliche Technik notwendig, die den Strom für die Kompensationsleiter bereitstellt. Zudem erzeugen die in den Kompensationsleitern fließenden Ströme ohmsche Verluste, die zu den Netzverlusten beitragen. Dies bedeutet, dass dieses Verfahren sowohl bei der Errichtung als auch beim Betrieb erhebliche Kosten verursachen kann, wobei zusätzlich das oben beschriebene Problem des Platzbedarfs für die Kompensationsleiter besteht. Doch auch die Stromquellen für die Kompensationsleiter müssten untergebracht werden, was in Anbetracht des Platzmangels in städtischen Gebieten problematisch sein kann. Insgesamt ist festzustellen, dass aktive mehr noch als passive Kompensationsleiter eine deutliche Verringerung der magnetischen Flussdichte mit sich bringen könnten, allerdings in der Praxis kaum sinnvoll umzusetzen sind.

Eine besondere Spielart der aktiven Kompensation besteht darin, in der Abschirmung von Mittel- oder Hochspannungskabeln Ströme fließen zu lassen, deren Magnetfelder die von den Innenleitern ausgehenden kompensieren sollen. Der besondere Reiz dieser Methode liegt darin, dass keinerlei zusätzliche Kompensationsleiter verlegt werden müssen. Fließt auf der Abschirmung jeweils 10% des durch den Innenleiter fließenden Stroms mit identischer Phasenlage, aber umgekehrtem Vorzeichen, lässt sich eine Verringerung der magnetischen Flussdichte um etwa 10% erzielen [39]. Es ist aber zu bedenken, dass die Abschirmung von Mittel- und Hochspannungskabeln in aller Regel einen geringeren Querschnitt und damit einen höheren ohmschen Widerstand aufweist als der Innenleiter, was bedeutet, dass bei gleicher Stromstärke im Außenleiter größere ohmsche Verluste entstehen. Diese tragen zur Erwärmung des Kabels bei, was bedeutet, dass sich bei Anwendung dieser Kompensationsmethode die übertragbare Leistung des Kabels überproportional verringert, da die höchstzulässige Kabeltemperatur und damit die erlaubte Verlustleistung unverändert bleiben. Insgesamt erscheint die Verhältnismäßigkeit dieser Minimierungsmethode fraglich, was nahelegt, dass sie zu Recht als nicht dem Stand der Technik entsprechend in der 26. BImSchVVwV fehlt.

5 Rechtliche Einordnung der 26. BImSchVVwV

In den vorstehenden Kapiteln wurden die von der 26. BImSchVVwV vorgesehenen Minimierungsmaßnahmen auf ihre Wirksamkeit hin geprüft. Dabei zeigte sich, dass die meisten dieser Maßnahmen grundsätzlich wirksam sind, auch wenn ihrer Umsetzung in der Praxis meist andere Gründe entgegenstehen. Bei wenigen Minimierungsmaßnahmen wurde entgegen den Angaben der 26. BImSchVVwV eine Wirkungslosigkeit oder sogar eine gegenteilige Wirkung festgestellt. Daneben wurden mehrere nicht von der 26. BImSchVVwV vorgesehen Minimierungsmaßnahmen untersucht und festgestellt, dass sie, unbeschadet ihrer Wirksamkeit, aus unterschiedlichen Gründen nicht dem Stand der Technik entsprechen.

Im Rahmen dieses Abschnitts soll zunächst die juristische Einordnung der 26. BImSchVVwV hergeleitet und anschließend geprüft werden, welche rechtlichen Auswirkungen sich unter Berücksichtigung der obigen Feststellungen ergeben.

5.1 Normkonkretisierende Teile der 26. BImSchVVwV

Wie in Abschnitt 2.7.2 dargestellt, wurde die in § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV vorgesehene Minimierung elektrischer und magnetischer Felder durch den Erlass der 26. BImSchVVwV im Jahr 2016 genauer geregelt. Diese erläutert in ihrem Abschnitt 1 den Anwendungsbereich, bestimmt in Abschnitt 2 Begriffe inhaltlich, gibt in den Abschnitten 3 und 4 Anleitungen zur Minimierung im Allgemeinen sowie zur Nachweismethode und beschreibt in Abschnitt 5 die technischen Möglichkeiten zur Minimierung einschließlich einer Einschätzung ihrer Wirksamkeit.

Nachfolgend soll betrachtet werden, welche Normqualität die Aufzählung dieser Minimierungsmaßnahmen und die Einschätzung ihrer Wirksamkeit in Abschnitt 5 der 26. BImSchVVwV haben. Sind sie nämlich normkonkretisierend, entfalten sie dahingehend Bindungswirkung, dass weder Verwaltung noch Gerichte weitere Minimierungsmaßnahmen prüfen müssen bzw. dass die in Abschnitt 5 aufgelisteten Minimierungsmaßnahmen hinsichtlich der Einschätzung ihrer technischen Wirksamkeit nicht in Frage gestellt werden dürfen (vorbehaltlich der Rechtmäßigkeit des Zustandekommens der Verwaltungsvorschrift). Dabei soll nur das nationale Recht betrachtet werden, da es keine korrespondierende europarechtliche Vorschrift zur 26. BImSchVVwV gibt.

5.1.1 Überblick über Verwaltungsvorschriften

Um die 26. BImSchVVwV einer der unterschiedlichen Arten von Verwaltungsvorschriften zuzuordnen, soll zunächst eine Abgrenzung der Verwaltungsvorschrift von der 26. BImSchV als Verordnung

vorgenommen und anschließend ein Überblick über die verschiedenen Arten von Verwaltungsvorschriften gegeben werden.

5.1.1.1 Abgrenzung zu den Regelungen in der 26. BImSchV

Die 26. BImSchV stützt sich auf die Ermächtigungsgrundlage des § 23 Abs. 1 des Bundesimmissionsschutzgesetzes – BImSchG – ([40] § 23 Rz. 33) und regelt die Anforderungen an die Errichtung, die Beschaffenheit und den Betrieb nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen zum Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen und zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder (§ 1 Abs. 1 Satz 2 der 26. BImSchV). Die Einschätzung, wann Umwelteinwirkungen (auf die Allgemeinheit und die Nachbarschaft) schädlich sind, trifft die 26. BImSchV, indem sie in den Anhängen Grenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder festlegt.

Diese Grenzwerte gemäß 26. BImSchV *„nehmen ganz selbstverständlich an der Geltungskraft der Rechtsverordnungen teil und sind damit verbindlich vorgegeben“* ([41] S. 1138). Verfassungsrechtlich sind diese Grenzwerte erst dann zu beanstanden, *„wenn erkennbar ist, dass sie die menschliche Gesundheit völlig unzureichend schützen. Liegen noch keine verlässlichen wissenschaftlichen Erkenntnisse über komplexe Gefährdungslagen [...] vor, verlangt die staatliche Schutzpflicht auch von den Gerichten nicht, ungesicherten wissenschaftlichen Erkenntnissen mit Hilfe des Prozessrechts durch Beweisaufnahmen zur Durchsetzung zu verhelfen oder die Vorsorgeentscheidung des Verordnungsgebers unter Kontrolle zu halten und die Schutzeignung der Grenzwerte jeweils nach dem aktuellen Stand der Forschung zu beurteilen. Es ist vielmehr Sache des Verordnungsgebers, den Erkenntnisfortschritt der Wissenschaft mit geeigneten Mitteln nach allen Seiten zu beobachten und zu bewerten, um gegebenenfalls weiter gehende Schutzmaßnahmen treffen zu können“*¹⁰. Weitere Maßnahmen, wie das zu untersuchende Minimierungsgebot nach § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV, genauer bestimmt in der 26. BImSchVVwV ([40] § 23 Rz. 33), ergänzen diese techniksteuernden Grenzwerte (zum Begriff [41] S. 1136 ff.).

5.1.1.2 Allgemeines zu Verwaltungsvorschriften

Verwaltungsvorschriften wie die 26. BImSchVVwV sind abstrakt-generelle Regelungen innerhalb der Verwaltungsorganisation, die von übergeordneten Verwaltungsinstanzen oder Vorgesetzten an nachgeordnete Behörden oder Bedienstete ergehen und die dazu dienen, Organisation und Handeln der Verwaltung einheitlich zu bestimmen (Thiel in [42] § 48 Rz. 2, Stand Mai 2017). Sie werden von der Exekutive und nicht von der Legislative erlassen. Abgesehen von Ausnahmen wie in § 48 des BImSchG¹¹ ergehen Verwaltungsvorschriften ohne besondere gesetzliche Ermächtigungsgrundlage bzw. aufgrund der Leitungs- und Weisungskompetenz der übergeordneten Verwaltungsinstanz¹². Für die Frage, ob einer Verwaltungsvorschrift über die Bindung der Verwaltung hinaus auch eine

¹⁰Bundesverfassungsgericht (BVerfG), Stattgebender Kammerbeschluss vom 24. Januar 2007 – 1 BvR 382/05 –, NVwZ 2007, 805, Rz. 18.

¹¹Zur beschränkten Funktion der Vorschrift im Hinblick auf Art. 84 Abs. 2 des Grundgesetzes (GG) siehe beispielsweise Thiel in [42] BImSchG § 48 Rz. 8, Stand Mai 2017.

¹²Thiel in [42] BImSchG § 48 Rz. 2, Stand Mai 2017; [43] S. 314.

bindende Wirkung gegenüber den Gerichten zukommt, ist nach den verschiedenen Arten von Verwaltungsvorschriften zu unterscheiden (Eichberger/Buchheister in [44] § 137 Rz. 22 ff., Stand April 2013).

5.1.1.3 Unterteilung

Im Wesentlichen lassen sich Verwaltungsvorschriften, soweit sie Verhalten lenken sollen und nicht organisatorische Abläufe regeln, in norminterpretierende, normkonkretisierende und ermessenslenkende Verwaltungsvorschriften unterteilen¹³. Sogenannte gesetzesvertretende Verwaltungsrichtlinien, wie sie im Bereich der gesetzessfreien Verwaltung vorkommen, so in der Leistungsverwaltung (beispielsweise Thiel in [42] BImSchG § 48 Rz. 4, Stand Mai 2017), sollen hier außen vor bleiben.

Die **norminterpretierende** (oder gesetzesauslegende) **Verwaltungsvorschrift** dient der Auslegung und Anwendung von Rechtsnormen, insbesondere bei Vorliegen unbestimmter Rechtsbegriffe ohne Beurteilungsspielraum. Die norminterpretierenden Verwaltungsvorschriften besitzen keine Außenwirkung (beispielsweise Schmitz in [45] § 1 Rz. 213). Sie sind durch die Gerichte inhaltlich auf ihre Vereinbarkeit mit Gesetz und Verfassung überprüfbar¹⁴. Norminterpretierende Regelungen enthält beispielsweise die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ausführung des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPVwV) gemäß § 20 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung – UVPG – (siehe auch [47] § 5 Rz. 530 ff.), „*vor allem indem sie den unbestimmten Rechtsbegriff ‚Bewertung‘ (§ 12 UVPG) für die Verwaltung verbindlich präzisiert*“ ([48] S. 85). Aber auch die Begriffsbestimmungen in Abschnitt 2 der 26. BImSchVVwV, wie beispielsweise 2.3 Bewertungsabstand, 2.4 Bezugspunkt, 2.5 Einwirkungsbereich oder 2.11 maßgeblicher Minimierungsort, sind, wie der Titel „Begriffsbestimmungen“ andeutet, norminterpretierend.

Normkonkretisierende Verwaltungsvorschriften dienen dazu, unbestimmte Rechtsbegriffe mit Beurteilungsspielraum¹⁵ zu konkretisieren. Bei unbestimmten Rechtsbegriffen mit Beurteilungsspielraum, „*vor allem wenn es um Einschätzungen, Beurteilungen, Wertungen oder Prognosen geht*“ (Riese in [44] § 114 Rz. 90, Stand Februar 2019), soll der rechtsanwendenden Behörde ein begrenzter Entscheidungsfreiraum zuzubilligen sein, und die Gerichte sollen insoweit in der Durchführung der rechtlichen Überprüfung eingeschränkt sein¹⁶. Unbestimmte Rechtsbegriffe mit Beurteilungsspielraum sind unter Berücksichtigung der Rechtsschutzgarantie des Art. 19 Abs. 4 des GG und des Rechtsstaatsprinzips nach Art. 20 Abs. 3 des GG, wonach eine möglichst wirksame gerichtliche Kontrolle von Verwaltungsentscheidungen anzustreben ist, die Ausnahme¹⁷. Faktisch sind im Laufe der Entwicklung der Rechtsprechung Fallgruppen für unbestimmte Rechtsbegriffe mit Be-

¹³Beispielsweise Thiel in [42] BImSchG § 48 Rz. 4 f., Stand Mai 2017; Schmitz in [45] § 1 Rz. 212-215; kritisch zur unklaren Differenzierung von norminterpretierenden und normkonkretisierenden Verwaltungsvorschriften [46] S. 1276.

¹⁴Bayerischer Verwaltungsgerichtshof (BayVG), Urteil vom 3. Mai 2018 – 20 BV 16.1961 –, ZLR 2018, 825, Rz. 35; Schmitz in [45] § 1 Rz. 213.

¹⁵Zu den weiteren Begrifflichkeiten Riese in [44] § 114 Rz. 91, Stand Februar 2019; zu normkonkretisierenden Verwaltungsvorschriften allgemein Rz. 169 ff.

¹⁶BVerwG, Vorlagebeschluss vom 10. Dezember 2014 – 6 C 16/13 –, juris, Rz. 36; detailliert zu den Problemen der Standardisierung der „*schädlichen Umwelteinwirkungen*“ beispielsweise W. Vallendar/M. Vallendar in [49] § 3 Rz. 48 ff.

¹⁷Kritisch beispielsweise Riese in [44] § 114 Rz. 115, Stand Februar 2019; zur Unbedenklichkeit im Hinblick auf Art. 19 Abs. 4 des GG z. B. BVerfG, Beschluss vom 31. Mai 2011 – 1 BvR 857/07 –, BVerfGE 129, 1, Rz. 72 ff.

urteilungsspielraum anerkannt worden, zu denen unter anderem Risikobewertungen und Prognoseentscheidungen im Bereich des Umwelt- und Wirtschaftsrechts zählen¹⁸. Normkonkretisierende Verwaltungsvorschriften im Umweltrecht konkretisieren und bestimmen „*technische Sachverhalte, Bewertungsvorgaben oder die Bereitstellung von Klassifikationssystemen*“ (Riese in [44] § 114 Rz. 169 ff., Stand Februar 2019).

Normkonkretisierenden Verwaltungsvorschriften, die unbestimmte Rechtsbegriffe mit Beurteilungsspielraum inhaltlich ausfüllen, kommt eine Bindungswirkung auch für die Gerichte zu, „*weil der mit dem erforderlichen Fachwissen ausgestatteten und insoweit sachnäheren Verwaltung eine Einschätzungsprärogative eingeräumt und die richterliche Kontrolle im entsprechenden Umfang zurückgenommen wird*“¹⁹. Zumindest in Teilen normkonkretisierende Verwaltungsvorschriften sind beispielsweise die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) aufgrund von § 48 des BImSchG und die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) aufgrund von § 48 des BImSchG²⁰.

Ermessenslenkende Verwaltungsvorschriften sind behördeninterne Anweisungen von übergeordneten Personen oder Stellen über die Fragen, ob und wie ein Ermessensspielraum eines Gesetzes in bestimmten Fällen auszuüben ist. Die Behörde hat einen Ermessensspielraum, wenn „*das Handeln der Behörde beim Setzen der Rechtsfolge gesetzlich nicht eindeutig und abschließend normiert*“ ist, ihr also „*verschiedene Handlungsoptionen offen*“ stehen ([51] S. 193). Ziel der ermessenslenkenden Verwaltungsvorschriften ist, eine einheitliche und gleichmäßige Ermessensausübung sicherzustellen; sie entfalten Bindungswirkung über den Grundsatz der Selbstbindung der Verwaltung gemäß Art. 3 Abs. 1 des GG (Schmitz in [45] § 1 Rz. 215).

5.1.1.4 Allgemeines zu normkonkretisierenden Verwaltungsvorschriften

„*Grundsätzlich sind Verwaltungsvorschriften Gegenstand und nicht Maßstab gerichtlicher Kontrolle. Die Gerichte sind bei ihrer Kontrolltätigkeit gegenüber der Verwaltung an Verwaltungsvorschriften grundsätzlich nicht gebunden. Sie dürfen ihren Entscheidungen vielmehr nur materielles Recht, zu dem Verwaltungsvorschriften nicht gehören, zugrunde legen und sind lediglich befugt, sich einer Gesetzesauslegung, die in einer Verwaltungsvorschrift vertreten wird, aus eigener Überzeugung anzuschließen [...]. Dies alles gilt grundsätzlich auch im Umwelt- und Technikrecht. Auch hier haben die Gerichte regelmäßig im Einzelfall festzustellen, was beispielsweise eine allgemein anerkannte Regel der Technik oder der Stand der Technik ist [...]. Im Umwelt- und Technikrecht bestehen aber Ausnahmen von diesen Grundsätzen. Einigen Verwaltungsvorschriften kommt hier eine normkonkretisierende Wirkung zu mit der Folge, dass sie unter bestimmten Voraussetzungen auch für Gerichte verbindlich und dann wie Normen auszulegen sind*“²¹.

Normkonkretisierende Wirkung im Sinne einer Außen- bzw. Bindungswirkung kann einer Verwaltungsvorschrift nach der Rechtsprechung nur dann zukommen, „*wenn die Exekutive bei ihrem Erlaß höherrangigen Geboten und dem für deren Konkretisierung wesentlichen Erkenntnis- und Erfahrungsstand Rechnung getragen hat [...]* bzw. *wenn die vom Gesetz getroffenen Wertungen beach-*

¹⁸[50] S. 607; Riese in [44] § 114 Rz. 114 f., Stand Februar 2019.

¹⁹BayVG, Urteil vom 3. Mai 2018 – 20 BV 16.1961 –, ZLR 2018, 825, Rz. 35.

²⁰Beispielsweise BVerwG, Urteil vom 28. Oktober 1998 – 8 C 16/96 –, BVerwGE 107, 338, Rz. 16.

²¹BVerwG, Urteil vom 28. Oktober 1998 – 8 C 16/96 –, BVerwGE 107, 338, Rz. 15 f.

*tet werden [...]. Auch darf die Verwaltungsvorschrift nicht durch Erkenntnisfortschritte in Wissenschaft und Technik überholt sein [...]. Schließlich kann einer Verwaltungsvorschrift nur dann ausnahmsweise normkonkretisierende Wirkung zukommen, wenn dem Erlaß ein umfangreiches Beteiligungsverfahren vorangeht, dessen Zweck es ist, vorhandene Erfahrungen und den Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis auszuschöpfen [...]. Nur dann verkörpert sie nämlich in hohem Maße wissenschaftlich-technischen Sachverstand*²². Des Weiteren darf keine atypische Fallgestaltung vorliegen²³ und das technische Regelwerk muss willkürfrei zustande gekommen sein²⁴.

Zur Rechtfertigung dieser Reduzierung der richterlichen Kontrolldichte im Hinblick auf Art. 19 Abs. 4 des GG führt das BVerfG im Wesentlichen aus, dass das Gebot effektiven Rechtsschutzes es nicht ausschließt, „dass durch den Gesetzgeber eröffnete Gestaltungs-, Ermessens- und Beurteilungsspielräume sowie die Tatbestandswirkung von Exekutivakten die Durchführung der Rechtskontrolle durch die Gerichte einschränken“. Die gerichtliche Kontrolle endet dort, „wo das materielle Recht in verfassungsrechtlich unbedenklicher Weise das Entscheidungsverhalten nicht vollständig determiniert und der Verwaltung einen Einschätzungs- und Auswahlspielraum belässt“²⁵. „Ob dies der Fall ist, muss sich ausdrücklich aus dem Gesetz ergeben oder durch Auslegung hinreichend deutlich zu ermitteln sein“²⁶.

Eine mehr praktische Überlegung liegt darin, dass unbestimmte Rechtsbegriffe insbesondere wegen „hoher Komplexität oder besonderer Dynamik der geregelten Materie so vage und ihre Konkretisierung im Nachvollzug der Verwaltungsentscheidung so schwierig sein [können], daß die gerichtliche Kontrolle an die Funktionsgrenzen der Rechtsprechung stößt. Der rechtsanwendenden Behörde mag in solchen Fällen ohne Verletzung rechtsstaatlicher Grundsätze ein begrenzter Entscheidungsfreiraum zuzubilligen sein“²⁷. Denn die rechtsanwendende Behörde ist „aufgrund der ihr zur Verfügung stehenden Handlungsformen für die erforderlichen Anpassungen besser ausgerüstet [...] als der Gesetzgeber und die Gerichte“²⁸.

Keine normkonkretisierende Wirkung kommt damit beispielsweise Verwaltungsvorschriften der Länder zu, „da für sie eine Mitwirkung der beteiligten Kreise nicht vorgeschrieben ist“ ([40] § 48 Rz. 67). Dies gilt folglich auch für die in Abschnitt 2.7.3 erwähnten LAI-Hinweise, die von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz verabschiedet wurden ([40] § 48 Rz. 68).

Ob Verwaltungsvorschriften ein ausreichendes Instrument zur Umsetzung von EU-Richtlinien darstellen²⁹, soll hier nicht beleuchtet werden, da Europarecht bei der Minimierung elektrischer und magnetischer Felder nicht betroffen ist.

²²BVerwG, Urteil vom 28. Oktober 1998 – 8 C 16/96 –, BVerwGE 107, 338, Rz. 17.

²³BVerwG, Beschluss vom 10. Juni 1998 – 7 B 25/98 –, NVwZ 1998, 1181, Rz. 24.

²⁴BVerwG, Urteil vom 19. Dezember 1985 – 7 C 65/82 –, BVerwGE 72, 300, Rz. 44; detailliert zu den Grenzen der Außenwirkung normkonkretisierenden Verwaltungsvorschriften [40] § 48 Rz. 57-63.

²⁵BVerfG, Beschluss vom 31. Mai 2011 – 1 BvR 857/07 –, BVerfGE 129, 1, Rz. 73; sogenannte normative Ermächtigungslehre, inzwischen wohl herrschende Meinung auch in der Literatur, vergleiche statt vieler Riese in [44] § 114 Rz. 94, Stand Februar 2019.

²⁶BVerfG, Beschluss vom 31. Mai 2011 – 1 BvR 857/07 –, BVerfGE 129, 1, Rz. 74; zu den Schwierigkeiten der Auslegung Riese in [44] § 114 Rz. 94, Stand Februar 2019.

²⁷BVerfG, Beschluss vom 17. April 1991 – 1 BvR 419/81 –, BVerfGE 84, 34, Rz. 48.

²⁸BVerfG, Stattgebender Kammerbeschluss vom 10. Dezember 2009 – 1 BvR 3151/07 –, NVwZ 2010, 435, Rz. 54.

²⁹Zur TA Luft: Europäischer Gerichtshof (EuGH), Urteil vom 30. Mai 1991 – C-59/89 –, Slg 1991, I-2607, Rz. 19 ff.

5.1.2 Rechtsprechung und Literatur

Im Folgenden soll der Frage nachgegangen werden, ob die 26. BImSchVVwV in Rechtsprechung und Literatur bereits eine Qualifizierung als normkonkretisierende Verwaltungsvorschrift erfahren hat.

5.1.2.1 Rechtsprechung

Die bisherige höchstrichterliche Verwaltungsrechtsprechung hat zur Einordnung der 26. BImSchVVwV als normkonkretisierende Verwaltungsvorschrift keine Aussagen getroffen. Soweit das BVerwG in Entscheidungen vor Geltung der 26. BImSchVVwV zu § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV Stellung nimmt, weist es im Wesentlichen auf dessen Inhalt hin. So erläutert es, dass § 4 Abs. 2 Satz 1 der 26. BImSchV *„keine Vorsorge vor Immissionen durch elektromagnetische Felder ‚um jeden Preis‘ und auf Kosten anderer in § 1 Abs. 1 [des Gesetzes über die Elektrizitäts- und Gasversorgung, Anmerkung des Verfassers] EnWG genannter Ziele“* verlangt und dass dieses Verständnis auch die 26. BImSchVVwV prägt³⁰. Weiter hat das BVerwG die Einholung eines Sachverständigengutachtens zur Ermittlung von Möglichkeiten einer weiteren Minimierung ausgeschlossen, weil *„weder konkret vorgetragen noch sonst ersichtlich [war], welche weiteren konkreten Minimierungsmaßnahmen der Beigeladenen auferlegt werden könnten, die sich ohne nennenswerte Abstriche bei anderen gesetzlichen Zielvorgaben verwirklichen ließen“*³¹. Soweit das BVerwG in seinem Urteil vom 22. Juni 2017³² die zu diesem Zeitpunkt bereits geltende 26. BImSchVVwV erwähnt, nimmt es nicht zu deren Einordnung als normkonkretisierende Verwaltungsvorschrift Stellung.

5.1.2.2 Literatur

Auch die Literatur hat, soweit ersichtlich, noch keine Einordnung der 26. BImSchVVwV vorgenommen. Zwar formulieren Schütte/Winkler in [52] S. 187: *„Die allgemeine Verwaltungsvorschrift konkretisiert das in § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV verankerte Minimierungsgebot. [...] Die allgemeine Verwaltungsvorschrift soll der zuständigen Vollzugsbehörde zukünftig als Entscheidungsgrundlage dienen, ob die Minimierung der Felder unter Berücksichtigung von Gegebenheiten im Einwirkungsbereich der jeweiligen Anlage sachgerecht geplant und umgesetzt wird. Hierzu legt sie ein einheitliches Prüf- und Bewertungsschema für die Minimierung fest und listet betriebsmittelspezifische Maßnahmen (z. B. Abstandsoptimierung, elektrische Schirmung, Optimieren der Mastkopfgeometrie oder der Polanordnung) auf“*. Damit wird jedoch die Einordnung der 26. BImSchVVwV als beispielsweise normkonkretisierende Verwaltungsvorschrift nicht vorgenommen. Die Formulierung *„konkretisiert“* ist nach Ansicht des Verfassers nicht in diesem Sinne gemeint.

Lediglich die *„Handlungsempfehlungen für EMF- und Schallgutachten zu Hoch- und Höchstspannungstrassen in Bundesfachplanungs-, Raumordnungs- und Planfeststellungsverfahren“* (siehe Abschnitt 2.7.3) stellen auf Seite 5 ohne weitere Untersuchung oder Begründung fest, die 26. BImSchVVwV sei normkonkretisierend.

³⁰BVerwG, Urteil vom 14. März 2018 – 4 A 5/17 –, BVerwGE 161, 263, Rz. 49.

³¹BVerwG, Urteil vom 14. März 2018 – 4 A 5/17 –, BVerwGE 161, 263, Rz. 50 f.

³²4 A 18/16, NVwZ 2018, 332, Rz. 21.

5.1.3 Einordnung als normkonkretisierende Verwaltungsvorschrift

Bei normkonkretisierenden Verwaltungsvorschriften beruht laut Rechtsprechung des BVerfG die Einschränkung der richterlichen Kontrolle unter anderem darauf, dass das materielle Recht das Entscheidungsverhalten nicht vollständig bestimmt und der Verwaltung einen Einschätzungs- und Auswahlspielraum belässt, wobei sich das Belassen dieses Einschätzungs- und Auswahlspielraums eindeutig aus dem Gesetz ergeben oder durch Auslegung zu ermitteln sein muss³³. Im Folgenden soll daher das Vorliegen einer solchen gesetzgeberisch angeordneten Beurteilungsermächtigung herausgearbeitet werden. Danach soll geprüft werden, ob die weiteren Voraussetzungen für eine normkonkretisierende Verwaltungsvorschrift erfüllt sind.

5.1.3.1 Gesetzliche Vorschriften

§ 22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 und 2 des BImSchG lauten:

„(1) *Nicht genehmigungsbedürftige Anlagen sind so zu errichten und zu betreiben, dass*

1. *schädliche Umwelteinwirkungen verhindert werden, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind,*
2. *nach dem Stand der Technik unvermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden [...]*“

Die Schutzpflicht nach § 22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 und 2 des BImSchG gilt im Unterschied zu der nach § 5 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 des BImSchG nicht absolut. Denn schädliche Umwelteinwirkungen durch nicht genehmigungsbedürftige Anlagen werden insoweit in Kauf genommen, als sie nach dem Stand der Technik nicht vermeidbar sind (Nr. 1) und auf ein Mindestmaß beschränkt (Nr. 2) bleiben³⁴. § 22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2 sieht damit eine Minimierungspflicht vor ([54] § 7 Rz. 130).

Nach § 23 Abs. 1 des BImSchG wird die Bundesregierung ermächtigt, nach Anhörung der beteiligten Kreise durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates vorzuschreiben, dass die Errichtung, die Beschaffenheit und der Betrieb nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen bestimmten Anforderungen zum Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen sowie zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen genügen müssen. Hierfür werden unter Nr. 1 bis 5 nicht abschließend Regelungsgegenstände formuliert. In der daraufhin erlassenen 26. BImSchV wurde neben der Festlegung von Grenzwerten in § 4 Abs. 2 das Minimierungsgebot des § 22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2 des BImSchG³⁵ aufgegriffen und wie folgt konkretisiert: *„Bei Errichtung und wesentlicher Änderung von Niederfrequenzanlagen sowie Gleichstromanlagen sind die Möglichkeiten auszuschöpfen, die von der jeweiligen Anlage ausgehenden elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Felder nach dem Stand der Technik unter Berücksichtigung von Gegebenheiten im Einwirkungsbereich zu minimieren. Das Nähere regelt eine Verwaltungsvorschrift gemäß § 48 des Bundes-Immissionsschutzgesetz“*.

³³BVerfG, Beschluss vom 31. Mai 2011 – 1 BvR 857/07 –, BVerfGE 129, 1, Rz. 73 f.

³⁴Das heißt nicht mit dem Ziel völliger Vermeidung schädlicher Umwelteinwirkungen, sondern vielmehr der Ermöglichung eines nachbarlichen Interessenausgleiches ([53] S. 38); Czajka in [49] § 22 Rz. 24; plakativ hierzu „Schädigungsrecht bei technisch unvermeidbaren Immissionen“ [47] § 15 Rz. 558.

³⁵Vergleiche im Hinblick auf die TA Lärm [40] § 48 Rz. 33.

§ 48 des BImSchG wiederum ordnet vor Erlass einer Verwaltungsvorschrift noch die Anhörung der „beteiligten Kreise“ an und modifiziert somit für den Bereich des Immissionsschutzrechtes die verfassungsrechtlichen Vorgaben des Art. 84 Abs. 2 des GG ([40] § 48 Rz. 2). „*Da es sich bei § 48 [des BImSchG] um eine allgemein gehaltene Ermächtigungsnorm handelt, ergibt sich der mögliche Inhalt von auf seiner Grundlage erlassenen Verwaltungsvorschriften aus dem Regelungsgehalt derjenigen Vorschriften im Bundesimmissionsschutzgesetz oder in Verordnungen zu seiner Durchführung, die durch die Verwaltungsvorschriften ergänzt, interpretiert bzw. konkretisiert werden sollen*“ (Thiel in [42] BImSchG § 48 Rz. 26, Stand Mai 2017). Die auf Grund des § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV am 26. Februar 2016 erlassene 26. BImSchVVwV, die in der Eingangsformel vor der Inhaltsübersicht neben § 48 des BImSchG auch auf Art. 84 Abs. 2 des GG verweist, regelt Details des Minimierungsgebotes.

Damit ergibt sich als auszulegende Ermächtigungsnorm § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV in Verbindung mit § 48 des BImSchG³⁶.

5.1.3.2 Auslegung der Ermächtigungsnorm

Bei der grammatikalischen (oder grammatischen) Auslegung ist der Wortlaut maßgebend³⁷. § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV verwendet zwar die Worte Beurteilungs-, Einschätzungs- oder Auswahlspielraum nicht³⁸. Jedoch gehen Rechtsprechung und (wohl) die Literatur überwiegend davon aus, dass die Ermächtigung in § 48 des BImSchG für die Einräumung eines Normenkonkretisierungsspielraums spricht. So bezeichnet das Bundesverwaltungsgericht im Urteil vom 20. Dezember 1999³⁹ § 48 des BImSchG als Ermächtigung, „*unbestimmte Rechtsbegriffe des Gesetzes durch generelle Standards zu konkretisieren*“. Im Urteil vom 10. Juli 2012⁴⁰ erkennt das BVerwG eine Ermächtigungsgrundlage für die Immissionsrichtwerte der TA Lärm in § 48 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 des BImSchG.

Aus der Literatur verweist Ruthig ([55] § 114 Rz. 25) darauf, Anhaltspunkt dafür, dass der Behörde ein Beurteilungsspielraum eingeräumt werden sollte, seien insbesondere die im „*Umwelt- und Technikrecht gesetzl [sic!] vorgesehenen Konkretisierungen unbestimmter Rechtsbegriffe durch Verwaltungsvorschriften*“. Jarass vertritt die Auffassung, dass die auf § 48 des BImSchG gestützten Verwaltungsvorschriften Außenwirkung haben; er leitet diese Konkretisierungsermächtigung daraus her, dass § 48 Abs. 1 des BImSchG das Verfahren näher regelt, mit der Folge, „*dass die gesetzlichen Vorgaben ‚auf Grund fachlichen Sachverständs, politischer Legitimation und verantwortlicher Bewertung konkretisiert‘ werden*“ ([40] § 48 Rz. 52). Schenk formuliert, § 48 des BImSchG räume „*dem Vorschriftengeber einen Konkretisierungsspielraum ein*“ ([49] § 48 Rz. 22). Koch/Hofmann gehen davon aus, dass sich letztlich wohl die Ansicht durchgesetzt habe, dass § 48 des BImSchG der

³⁶So auch [53] S. 45 (damals andere Paragraphennummer); [40] § 48 Rz. 52; Thiel in [42] BImSchG § 48 Rz. 8, Stand Mai 2017, sieht die Bedeutung des § 48 eher in der „*Regelung von Verfahrensvorgaben für die Normsetzung*“.

³⁷Beispielsweise Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg, Urteil vom 10. Juni 1998 – 10 S 58/97 –, NVwZ 1998, 987, Rz. 21.

³⁸Anders als beispielsweise in § 10 Abs. 2 Satz 2 des Telekommunikationsgesetzes: „*im Rahmen des ihr zustehenden Beurteilungsspielraums [...]*“.

³⁹7 C 15/98, BVerwGE 110, 216, Rz. 11.

⁴⁰7 A 11/11, BVerwGE 143, 249, Rz. 31.

Bundesregierung eine Beurteilungsermächtigung im Rahmen der gesetzlichen Vorgaben einräume, halten die herrschende Meinung aber für schwerlich vertretbar⁴¹.

Damit ermächtigt § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV in Verbindung mit § 48 des BImSchG schon dem Wortlaut nach zum Erlass der normkonkretisierenden 26. BImSchVVwV. Das Ergebnis der grammatischen Auslegung wird bestätigt durch die historische Auslegung. Die historische Auslegung ist dadurch gekennzeichnet, dass hierfür auf die Motive des Gesetzgebers in ihrem geschichtlichen Zusammenhang abgestellt wird⁴². Hierzu formuliert die Bundestags-Drucksache 17/12372 vom 19. Februar 2013 auf S. 14: *„Konkrete Maßstäbe, Minderungsziel, Festlegungen der technischen Parameter einer Anlage und Rahmenbedingungen werden im Rahmen der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift spezifiziert werden“* [16]. Daraus ist nach Auffassung des Verfassers ersichtlich, dass der Verordnungsgeber der Exekutive einen Einschätzungs- und Auswahlspielraum bei der konkreten Umsetzung des Minimierungsgebotes eingeräumt hat, weil er die Regelung von Einzelheiten der Exekutive überlassen hat.

Der systematischen Auslegung, also der Betrachtung der auszulegenden Vorschrift im Zusammenhang mit anderen Vorschriften, *„denen gemeinsam die Aufgabe zukommt, einen bestimmten Fragenkomplex zu regeln“* ([57] S. 491 f.), sowie der teleologischen Auslegung, also der Auslegung nach Sinn und den Zweck der Norm⁴³, wird vor diesem Hintergrund keine Bedeutung mehr eingeräumt.

5.1.3.3 Weitere Voraussetzungen

Weiter kann, wie in Abschnitt 5.1.1.4 dargestellt, einer Verwaltungsvorschrift Außenwirkung nur zukommen, wenn

- dem Erlass ein umfangreiches Beteiligungsverfahren vorangegangen ist mit dem Zweck, vorhandene Erfahrungen und den Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis auszuschöpfen,
- bei Erlass höherrangigen Geboten Rechnung getragen worden ist bzw. die vom Gesetz getroffenen Wertungen berücksichtigt worden sind und
- wenn der für die Konkretisierung wesentliche Erkenntnis- und Erfahrungsstand gewürdigt worden und nicht durch Erkenntnisfortschritte in Wissenschaft und Technik überholt ist.

Es bestehen keine Anhaltspunkte, dass das erforderliche Beteiligungsverfahren nicht durchgeführt worden wäre ([58] S. 106 ff). Ein Verstoß der 26. BImSchVVwV gegen höherrangige Gebote und die vom Gesetz getroffenen Wertungen ist ebenso wenig erkennbar.

Wenngleich beispielsweise in Abschnitt 3.2.3 gewisse Widersprüche zwischen der von der 26. BImSchVVwV vertretenen und der tatsächlichen Wirksamkeit einer Minimierungsmaßnahme festgestellt wurden, kann doch im Wesentlichen die Berücksichtigung des bei Erlass der 26. BImSchVVwV geltenden Standes der Technik bejaht werden. Da der technische Fortschritt im hier in Frage

⁴¹Einzelheiten hierzu in [56] § 4 Rz. 121 ff.; ablehnend zu einer Ermächtigung für außenverbindliche Verwaltungsvorschriften Koch, Braun in [46] S. 1276.

⁴²So BVerfG mit weitergehenden Ausführungen im Beschluss vom 17. Mai 1960 – 2 BvL 11/59 –, BVerfGE 11, 126, Rz. 16.

⁴³Beispielsweise BayVGH, Urteil vom 24. Mai 2011 – 22 B 10.1875 –, DVBl 2011, 1045, Rz. 18.

stehenden Bereich der klassischen, nicht-leistungselektronischen Energieübertragungstechnik sehr langsam voranschreitet, ist dies auch weiterhin anzunehmen.

5.1.3.4 Abgrenzung zu ermessenslenkenden und norminterpretierenden Verwaltungsvorschriften

Zwar setzt Abschnitt 5 der 26. BImSchVVwV keine Grenzwerte gemäß § 48 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 („*Immissionswerte, die zu dem in § 1 genannten Zweck nicht überschritten werden dürfen*“) und Nr. 2 („*Emissionswerte, deren Überschreiten nach dem Stand der Technik vermeidbar ist*“) des BImSchG fest. Jedoch stellt die Aufzählung der Minimierungsmaßnahmen samt der Feststellung ihrer Wirksamkeit auch keine Verfahrensregelung gemäß Nr. 3 („*das Verfahren zur Ermittlung der Emissionen und Immissionen*“) mit der Folge einer Einordnung als norminterpretierende oder ermessenslenkende Verwaltungsvorschrift⁴⁴ dar. Denn Abschnitt 5 der 26. BImSchVVwV erläutert zwar Minimierungsmaßnahmen und ihre Wirksamkeit, beschränkt sich aber nicht darauf. Vielmehr zählt er diese abschließend auf, schließt damit andere Minimierungsmaßnahmen aus und stellt endgültig ihre Wirksamkeit fest. Diese Ergebnisse beruhen – wie sich aus [58] ergibt – auf technischen Prüfungen wie Literaturrecherche, wissenschaftlichem Fachkolloquium und Einholung von Stellungnahmen. Sie beanspruchen ähnlich Geltung wie Grenzwerte.

Abschnitt 5 unterscheidet sich damit wesentlich von anderen Teilen der 26. BImSchVVwV. So bietet Abschnitt 2 der 26. BImSchVVwV Begriffsbestimmungen. Weiter steuert beispielsweise Abschnitt 3.2 (Vorgehen zur Umsetzung des Minimierungsgebotes) insbesondere mit den Hinweisen zur Vorprüfung in Abschnitt 3.2.1 und den Anweisungen zur Ermittlung der Minimierungsmaßnahmen in Abschnitt 3.2.2 Art und Umfang der Sachverhaltsermittlung. Hilfestellung bei der Ermessensausübung wiederum geben Abschnitt 3.1 (Minimierungsziel und Rahmenbedingungen) und Abschnitt 3.2.3 (Maßnahmenbewertung, Festlegung der Minimierungsmaßnahmen)⁴⁵.

5.1.3.5 Ergebnis

Als Ergebnis kann damit festgehalten werden, dass sich die normative Ermächtigung der Verwaltung zur Letztentscheidung mit der Folge einer eingeschränkten gerichtlichen Kontrolldichte betreffend Abschnitt 5 der 26. BImSchVVwV aus § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV in Verbindung mit § 48 des BImSchG ergibt und dass insoweit auch die weiteren Voraussetzungen der Rechtsprechung für normkonkretisierende Verwaltungsvorschriften vorliegen. Hierbei bleibt ohne praktische Bedeutung, welche der Nummern in § 48 Abs. 1 des BImSchG einschlägig sind, weil „*insbesondere*“ lediglich eine beispielhafte Aufzählung vorgibt.

Außen vor soll im Rahmen dieser Arbeit bleiben, ob es hinreichend demokratisch legitimiert ist, wertende Entscheidungen im Technikrecht faktisch auf die Verwaltung zu verlagern, oder ob es

⁴⁴Vergleiche hierzu VG Würzburg, Urteil vom 22. Januar 2013 – W 4 K 11.1137 –, juris, Rz. 66 mit weiteren Nachweisen.

⁴⁵Entsprechend bezeichnet beispielsweise Hansmann in [42] TA Luft Vorbemerkung Rz. 3, Stand April 2004, Teile der TA Luft, die Richtlinien zur Ermessensausübung enthalten bzw. die anordnen, wie Messungen durchzuführen sind oder Beurteilungspunkte zu wählen sind, als ermessenslenkend.

nicht die Aufgabe des demokratisch legitimierten Gesetzgebers ist, in Ungewissheitslagen wertende Gestaltungsentscheidungen zu treffen⁴⁶.

5.1.4 Vergleich mit TA Luft und TA Lärm

Neben der Prüfung der von der Rechtsprechung formulierten Voraussetzungen für normkonkretisierende Verwaltungsvorschriften soll auch eine Untersuchung der von Rechtsprechung und Literatur gebildeten Fallgruppen mit reduzierter gerichtlicher Kontrolldichte, und hier insbesondere der als normkonkretisierend anerkannten Verwaltungsvorschriften TA Luft und TA Lärm, dahingehend erfolgen, ob sich daraus für die Einordnung des Abschnittes 5 der 26. BImSchVVwV als normkonkretisierende Verwaltungsvorschrift verwertbare Erkenntnisse ergeben⁴⁷.

5.1.4.1 TA Luft und TA Lärm als Beispiele für normkonkretisierende VwV

Im Urteil vom 17. Februar 1978 nahm das BVerwG eine Bindungswirkung der in der TA Luft festgelegten Immissionswerte an, weil sie *„wegen der gesetzlich vorgeschriebenen Art und Weise ihrer Ermittlung für die Beantwortung der Frage, ob Immissionen geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen, eine geeignete, wenn nicht optimale Erkenntnisquelle darstellen, weil sie auf den zentral – durch die Bundesregierung – ermittelten Erkenntnissen und Erfahrungen von Fachleuten verschiedener Fachgebiete beruhen und deswegen als schon die Entscheidung der Genehmigungsbehörde prägendes und insofern ‚antizipiertes‘ Sachverständigengutachten [...] wegen ihres naturwissenschaftlich fundierten fachlichen Aussagegehaltes auch für das kontrollierende Gericht bedeutsam sind“*⁴⁸. Zehn Jahre später führte das BVerwG aus, dass es im Urteil vom 17. Februar 1978 mit der Qualifizierung der in der TA Luft festgelegten Immissionswerte als *„antizipiertes“* Sachverständigengutachten – woran es nun nicht mehr festhielt – zum Ausdruck hat bringen wollen, *„daß die Werte ‚wegen ihres naturwissenschaftlich fundierten fachlichen Aussagegehalts auch für das kontrollierende Gericht bedeutsam sind‘ [...] und daß sie für die Ermittlung der Schädlichkeit von Umwelteinwirkungen eine ‚weitaus verlässlichere Basis‘ darstellen [...] als eine für den Einzelfall angestellte Untersuchung ohne diese Basis“*⁴⁹.

Schließlich hat es betreffend normkonkretisierende Verwaltungsvorschriften zusammenfassend formuliert: *„Allgemeine Verwaltungsvorschriften dieser Art sind [...] dadurch gekennzeichnet, daß sie auf der Grundlage einer entsprechenden Ermächtigung (vgl. § 48 BImSchG) unbestimmte Rechtsbegriffe des Gesetzes durch generelle Standards konkretisieren, die entsprechend der Art ihres Zustandekommens ein hohes Maß an wissenschaftlich-technischem Sachverstand verkörpern und zugleich*

⁴⁶Kritisch hierzu beispielsweise [41] S. 1142: *„Mit kognitiven Schwächen müssen wir leben – mit legitimatorischen Schwächen indes nicht“*.

⁴⁷Die Rahmen-Abwasser-Verwaltungsvorschrift aufgrund von § 7 a Abs. 1 Satz 3 des Gesetzes zur Ordnung des Wasserhaushalts (WHG), die Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen aufgrund von § 4 Abs. 5 des Abfallgesetzes (AbfG) und die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm (AVV Baulärm) sollen aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht betrachtet werden; dasselbe gilt für atomrechtliche Verwaltungsvorschriften.

⁴⁸I C 102.76, BVerwGE 55, 250, Rz. 37; im *„Kern ging es darum, Grenzwertsetzungen auf Sachverstand zu reduzieren und aus Sachverstand Geltung zu folgern“* ([41] S. 1139).

⁴⁹BVerwG, Beschluss vom 15. Februar 1988 – 7 B 219/87 –, NVwZ 1988, 824, Rz. 5.

auf abstrakt-genereller Abwägung beruhende Wertungen des hierzu berufenen Vorschriftengebers zum Ausdruck bringen [...]. Da normkonkretisierende Verwaltungsvorschriften mit dieser Funktion an die bei ihrem Erlass bestehenden Erkenntnisse in Wissenschaft und Technik anknüpfen und ihre rechtliche Außenwirkung erst verlieren, soweit die ihnen zugrundeliegenden Annahmen durch weitere gesicherte Erkenntnisfortschritte in Wissenschaft und Technik überholt [...] sind, werden sie in besonderem Maße von entstehungsgeschichtlich bedingten Erwägungen geprägt“⁵⁰.

Auch hinsichtlich einzelner Regelungen von TA Luft und TA Lärm hat die Rechtsprechung normkonkretisierende Eigenschaften erkannt. Beispielsweise sind die in Nr. 3.1.7 der TA Luft (1986) bestimmten Massenstromwerte „für die jeweiligen Stoffe zusammen mit den ihnen zugeordneten Massenkonzentrationswerten Ausdruck einer generellen Konkretisierung der Risikoproportionalität emissionsbegrenzender Maßnahmen“⁵¹; die Emissionswerte der TA Luft „konkretisieren die Anforderungen, die im Regelfall an den Betrieb einer Anlage zu stellen sind“⁵²; den „normkonkretisierenden technischen Regelwerken der TA Luft und der TA Lärm kommt, soweit sie den unbestimmten Rechtsbegriff der schädlichen Umwelteinwirkungen im Hinblick auf Luftschadstoffe oder Lärm konkretisieren“, Bindungswirkung zu⁵³; die TA Lärm vom 26. August 1998 ist, „soweit sie für Geräusche den unbestimmten Rechtsbegriff der schädlichen Umwelteinwirkungen“ konkretisiert, für die Gerichte bindend⁵⁴.

Auch nach einhelliger Meinung in der Literatur sind TA Luft und TA Lärm (zumindest in Teilen) normkonkretisierend. So sind nach Hansmann ([42] TA Lärm Vorbemerkung Rz. 5, Stand Dezember 2006) normkonkretisierend die Festlegung der Immissionsrichtwerte in Nr. 6 der TA Lärm, die besonderen Regelungen in Nr. 7 und das in der TA Lärm festgelegte Mess- und Beurteilungsverfahren, das als „untrennbarer Bestandteil des Immissionsrichtwertekonzepts [...] insoweit auch der Normkonkretisierung dient“. Nach Jarass ([40] § 48 Rz. 33) werden die „Anforderungen des § 22 Abs. 1 S. 1 Nr. 1, 2 [...] im Bereich des Lärms durch die Nr. 4 TA Lärm konkretisiert“; weiter „ergeben sich wichtige Konkretisierungen aus Nr. 5.1 und Nr. 5.3 TA Lärm“ ([40] § 17 Rz. 75).

Nach Hansmann dienen bei der TA Luft „die Immissionswerte, wie sie in Nrn. 4.2.1, 4.3.1, 4.4.1 und 4.5.1 TA Luft enthalten sind, der Konkretisierung des Begriffs der schädlichen Umwelteinwirkungen, und die Emissionswerte, wie sie insbesondere in Abschnitt 5.2 der TA Luft festgelegt sind, der Konkretisierung des Begriffs des Standes der Technik“ (in [42] TA Luft Vorbemerkung Rz. 2, Stand April 2004). Laut Jarass konkretisiert die TA Luft „die Anforderungen des BImSchG für genehmigungsbedürftige und (mit gewissen Einschränkungen) für nicht genehmigungsbedürftige Anlagen im Hinblick auf die Luftreinhaltung“ ([40] § 48 Rz. 37).

⁵⁰BVerwG, Urteil vom 20. Dezember 1999 – 7 C 15/98 –, BVerwGE 110, 216, Rz. 11; eine allgemeine Darstellung zu TA Luft und TA Lärm im Hinblick auf deren normkonkretisierende Eigenschaft findet sich auch bei [47] § 15 Rz. 100 ff.

⁵¹BVerwG, Urteil vom 20. Dezember 1999 – 7 C 15/98 –, BVerwGE 110, 216, Leitsatz 2.

⁵²BVerwG, Urteil vom 21. Juni 2001 – 7 C 21/00 –, BVerwGE 114, 342, Leitsatz 1.

⁵³Verwaltungsgerichtshof Baden-Württemberg, Beschluss vom 14. Oktober 2015 – 10 S 1469/15 –, DVBl 2015, 1599, Rz. 9.

⁵⁴BVerwG, Urteil vom 29. August 2007 – 4 C 2/07 –, BVerwGE 129, 209, Leitsatz 1.

5.1.4.2 Schlussfolgerungen

Damit geht die höchstrichterliche Verwaltungsrechtsprechung seit Ende der 1970er-Jahre davon aus, Festsetzungen in solchen Technischen Anleitungen als verbindliche Vorgaben anzusehen. Die *„Vorstellung einer rechtsnormähnlichen Verbindlichkeit der Technischen Anleitungen [hat sich] aus praktischen Gründen bis heute gehalten. Lediglich die Begründung ist eine andere geworden“* ([41] S. 1139).

Die Suche nach einer demokratischen Legitimation dieser der Verwaltung eingeräumten Letztentscheidungsbefugnis ohne die Verbindlichkeit der Technischen Anleitungen für die Gerichte in Zweifel zu ziehen, lässt nach Ansicht des Verfassers erkennen, dass die Technischen Anleitungen aus Praktikabilitätsbegründungen wie der Sicherstellung des gleichmäßigen und berechenbaren Gesetzesvollzugs⁵⁵ oder zur Gewähr von höherer Sachrichtigkeit (aufgrund ihrer besonderen Art des Zustandekommens, §§ 48 und 51 des BImSchG) *„als die gerichtlichen Möglichkeiten zur Risikobewertung“*⁵⁶ verbindlich sein sollen⁵⁷.

Die vorgenannten Gründe, die für eine normkonkretisierende Wirkung der TA Luft und TA Lärm sprechen, gelten auch für den zu untersuchenden Abschnitt 5 der 26. BImSchVVwV.

Zwar sind die TA Luft und TA Lärm im Wesentlichen normkonkretisierend, soweit sie Grenzwerte für Schadstoffe festlegen. Eine vergleichbare Grenzwertfestsetzung erfolgt hingegen für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder bereits in der 26. BImSchV. Dennoch sollen die in Abschnitt 5 der 26. BImSchVVwV angesprochenen Standards, nämlich die abschließende Aufzählung von Minimierungsmaßnahmen sowie die Einschätzung ihrer Wirksamkeit als Konkretisierung des insoweit bestehenden Standes der Technik, vergleichbar der TA Luft und der TA Lärm, den gleichmäßigen und berechenbaren Gesetzesvollzug sicherstellen. Die abschließende Aufzählung der Minimierungsmaßnahmen und die Einschätzung ihrer Wirksamkeit verkörpern entsprechend der Art ihres Zustandekommens ein hohes Maß an wissenschaftlich-technischem Sachverstand und bringen zugleich auf abstrakt-genereller Abwägung beruhende Wertungen des hierzu berufenen Vorschriftengebers zum Ausdruck. Der Funktion dieser Standards wird es allein gerecht, diese abschließend aufgezählten Minimierungsmaßnahmen samt Einschätzung ihrer technischen Wirksamkeit als bindende Vorgabe für die Anforderungen an die Minimierung aufzufassen.

Erst in zweiter Linie werden diese Minimierungsmaßnahmen dann einer Abwägung mit anderen Schutzgütern wie beispielsweise dem Umweltschutz unterworfen und in diesem Bereich (nämlich unter anderem in Abschnitt 3 der 26. BImSchVVwV) liegen gegebenenfalls ermessenslenkende oder norminterpretierende Regelungen vor.

⁵⁵BVerwG, Urteil vom 21. Juni 2001 – 7 C 21/00 –, BVerwGE 114, 342, Rz. 11.

⁵⁶[41] S. 1139; vergleiche auch aus der Praxis [59] S. 2236.

⁵⁷So sprechen Koch/Hofmann in [56] § 4 Rz. 120 von der *„erwünschten Rechtsfolge“*; deutlich formuliert Wolf in [60] S. 254: *„Hinter der kaum nachvollziehbaren Begründung der Einschränkung der richterlichen Kontrolldichte, die Exekutive verfüge, auch im Verhältnis zu den Verwaltungsgerichten über rechtliche Handlungsformen, die sie für die Verwirklichung des Grundsatzes bestmöglicher Gefahrenabwehr und Risikovorsorge sehr viel besser ausrüsten, kann nur das Defizit rechtlicher Kontrollmaßstäbe vermutet werden, wodurch eine judikative Überprüfung des Amalgams aus wissenschaftlicher und umweltpolitischer Bewertung, das jeder Risikoeinschätzung zugrunde liegt, vollends prekär werden muß“*.

Bestärkend hinsichtlich der Einordnung des Abschnitts 5 der 26. BImSchVVwV als normkonkretisierend wirken die folgenden praktischen Überlegungen: Ebenso wie es bei den Grenzwertfestsetzungen um die „*Verarbeitung naturwissenschaftlich-technischen Wissens*“ geht ([61] S. 137), geht es auch bei den betrachteten Minimierungsmaßnahmen und der Einschätzung ihrer Wirksamkeit um die Verarbeitung wissenschaftlich-technischer Erkenntnisse. Geeignete Handlungsform hierfür⁵⁸ ist – ebenso wie bei den Technischen Anleitungen – die Rechtskonkretisierung durch die sachkundige Verwaltung, die zeitnah neue Erkenntnisse verarbeiten und die Regelungen zum Gesundheitsschutz der Bürger aktualisieren kann⁵⁹.

Zudem greift auch bei der abschließenden Aufzählung der Minimierungsmaßnahmen samt Einschätzung ihrer Wirksamkeit – ebenso wie bei den Technischen Anleitungen – der mehr oder weniger verborgene Grundgedanke für die Übertragung der Letztentscheidungsbefugnis auf die Exekutive, nämlich die Erhaltung der Funktionsfähigkeit der Verwaltungsgerichte insbesondere im Hinblick auf die Durchführung von umfänglichen Beweisaufnahmen ([63] S. 412). Entsprechend klar hat das Schleswig-Holsteinische Verwaltungsgericht⁶⁰ formuliert: *„Es sprechen auch ganz gewichtige praktische Gründe gegen eine derartige Ausweitung der gerichtlichen Überprüfung. Die Wiederholung des von der Exekutive schon durchgeführten Beurteilungsvorganges unter gerichtlicher Aufsicht würde alle zeitlichen Grenzen gerichtlicher Verfahren sprengen. Zudem sind die VGe weder organisatorisch noch personell in der Lage, diesen Bewertungsvorgang selbst vorzunehmen. Die VGe müssen sich deshalb auf eine Rechtskontrolle der Verwaltungsentscheidung beschränken. Dabei ist auch für ihre Entscheidung das Regelwerk wegen seines naturwissenschaftlich fundierten fachlichen Aussagegehaltes eine geeignete Erkenntnisquelle, weil es auf den zentral – durch die Bundesregierung – ermittelten Erkenntnissen und Erfahrungen von Fachleuten verschiedener Fachgebiete beruht“*.

Im Lichte des Umfangs der vorstehenden technischen Ausführungen können diese Überlegungen auf die Überprüfung des Abschnitt 5 der 26. BImSchVVwV übertragen werden, da eine Wiederholung der durchgeführten Untersuchungen für ein gegebenenfalls damit befasstes Gericht einen unverhältnismäßigen Aufwand darstellen würde.

5.1.5 Ergebnis

Abschnitt 5 der 26. BImSchVVwV ist, soweit er technische Minimierungsmaßnahmen abschließend aufzählt und deren Wirksamkeit regelt, ein normkonkretisierender Teil der 26. BImSchVVwV. Die abschließende Aufzählung der Minimierungsmaßnahmen und die Einschätzung ihrer technischen Wirksamkeit konkretisieren den Stand der Technik (als unbestimmten Rechtsbegriff mit Beurteilungsspielraum) gemäß § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV.

Im Ergebnis bedeutet dies, dass die im Rahmen dieser Arbeit als unwirksam erkannten Minimierungsmaßnahmen der Erhöhung des Mastes bei Maststationen (siehe Abschnitt 3.3), die bei einigen Phasenanordnungen mit gegenteiliger Wirkung behaftete Maßnahme der Verringerung des System-Achsabstandes von Erdkabeln (siehe Abschnitt 3.2.3) und die in einem kleinen Teil des Ein-

⁵⁸Um „dem sozio-technischen Charakter der Normbildung gerecht“ zu werden ([61] S. 137).

⁵⁹Sogenannter „dynamischer Grundrechtsschutz“, BVerfG, Beschluss vom 8. August 1978 – 2 BvL 8/77 –, BVerfGE 49, 89, Rz. 111; vergleiche auch [62] S. 341; kritisch hierzu [61] S. 138.

⁶⁰Urteil vom 17. März 1980 – 10 A 512/76 –, NJW 1980, 1296, S. 1298, betreffend atomrechtliche Empfehlungen und Leitlinien.

wirkungsbereich eine Flussdichteerhöhung bewirkende Mitteneinspeisung auf der Niederspannungs-Sammelschiene der Fertigstation Typ 4227 (siehe Abschnitt 3.3.2) dennoch von der Verwaltung und von den Gerichten als wirksam anzusehen sind.

Einschränkend sei dabei auf Abschnitt 3.2.2.3 der 26. BImSchVVwV hingewiesen, der festlegt: *„Das Minimierungspotential ist entweder über Mess- und Berechnungsverfahren oder über eine pauschalierende Betrachtung, zum Beispiel durch Vergleich mit bestehenden Anlagen, zu ermitteln“*. Wird das Minimierungspotential einer Minimierungsmaßnahme vom Betreiber oder durch eine Behörde durch Messung oder Berechnung bestimmt, wird die von Abschnitt 5 der 26. BImSchVVwV bereits vorgenommene Einschätzung der Wirksamkeit durch die Mess- bzw. Berechnungsergebnisse ersetzt. Der normkonkretisierende Charakter des Abschnittes 5 beschränkt sich in diesem Fall auf die abschließende Aufzählung der Minimierungsmaßnahmen und die Einschätzung der Wirksamkeit der nicht mittels Rechnung und/oder Messung geprüften Minimierungsmaßnahmen.

In der Praxis ist allerdings davon auszugehen, dass eine Messung oder Berechnung der Wirksamkeit einer Minimierungsmaßnahme nur dann erforderlich sein wird, wenn Abschnitt 5 der 26. BImSchVVwV eine teilweise gegenteilige Wirkung dieser Maßnahme einräumt – in diesem Fall dient die Rechnung bzw. Messung dazu, sicherzustellen, dass kein maßgeblicher Minimierungsort durch die Durchführung dieser Maßnahme höheren Feldstärke- bzw. Flussdichtewerten ausgesetzt wird. In allen übrigen Fällen, in denen die 26. BImSchVVwV eine unumschränkte Wirksamkeit von Minimierungsmaßnahmen postuliert, ist eine pauschalierende Betrachtung unter Zuhilfenahme des Abschnitts 5 der 26. BImSchVVwV die einfachere Vorgehensweise. Dies ist bei allen drei oben genannten unwirksamen Minimierungsmaßnahmen der Fall.

5.2 Ermessenslenkende Teile der 26. BImSchVVwV

Neben der abschließenden Darstellung von Minimierungsmaßnahmen samt Einschätzung ihrer Wirksamkeit in Abschnitt 5 ist für die konkrete Auswahl einer Minimierungsmaßnahme unter anderem die Bewertung der ermittelten technischen Möglichkeiten nach Abschnitt 3.2.3 der 26. BImSchVVwV bedeutsam. Nachfolgend soll untersucht werden, wie sich die normkonkretisierende Eigenschaft der in Abschnitt 5 dargestellten technischen Möglichkeiten bei der konkreten Auswahl der Minimierungsmaßnahmen auswirkt. Dabei ist von Interesse, ob die oben als technisch unwirksam erkannten Minimierungsmaßnahmen zu einem Ermessensfehler bei der Ermessensausübung führen.

5.2.1 Ermessen und ermessenslenkende Verwaltungsvorschriften

Im Folgenden soll zuerst ein Überblick über den Begriff des Ermessens, mögliche Arten von Ermessensfehlern und über ermessenslenkende Vorschriften gegeben werden. Anschließend sollen – nach einem Blick auf Rechtsprechung und Literatur – die so gewonnenen Erkenntnisse auf Abschnitt 3.2.3 der 26. BImSchVVwV übertragen werden.

5.2.1.1 Allgemeines

Ist die Behörde zu einem bestimmten Handeln verpflichtet, ist die im Gesetz angegebene Rechtsfolge zu treffen (gebundene Entscheidung). Dagegen liegt Ermessen vor, wenn der handelnden Behörde auf der Rechtsfolgenrechte einer Norm ein Handlungsspielraum eingeräumt ist (beispielsweise Pautsch in [64] § 40 Rz. 1). Das Ermessen im Verwaltungsverfahren regelt § 40 des Verwaltungsverfahrensgesetzes (VwVfG): *„Ist die Behörde ermächtigt, nach ihrem Ermessen zu handeln, hat sie ihr Ermessen entsprechend dem Zweck der Ermächtigung auszuüben und die gesetzlichen Grenzen des Ermessens einzuhalten“*. Damit kommt zum Ausdruck, dass das Verwaltungshandeln auf einer pflichtgemäßen Ermessensentscheidung beruhen, das Ermessen also frei von Ermessensfehlern ausgeübt werden muss.

Üblicherweise wird hinsichtlich der Arten des Ermessens unterschieden zwischen Entschließungsermessen und Auswahlermessen. Die Entscheidung darüber, ob oder wann eine Behörde überhaupt tätig wird, wird als Entschließungsermessen bezeichnet; unter den Begriff Auswahlermessen fällt die Entscheidung der Behörde darüber, wie sie im Einzelfall vorgeht, also unter anderem welche von mehreren möglichen Maßnahmen sie auswählt⁶¹. Die beim Auswahlermessen bestehende Wahlmöglichkeit zwischen mehreren Handlungsmöglichkeiten kann unter Umständen auf eine Alternative beschränkt sein, wenn von den zur Verfügung stehenden möglichen Rechtsfolgen nur eine einzige ermessensfehlerfrei gewählt werden kann⁶². Ob einer Behörde bei ihrer Entscheidung Ermessen zusteht, muss durch Auslegung des anzuwendenden Gesetzes ermittelt werden; die Formulierung „kann“ deutet meist darauf hin⁶³.

Bezogen auf die nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen regelt § 22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2 des BImSchG, dass nicht genehmigungsbedürftige Anlagen so zu errichten und zu betreiben sind, dass nach dem Stand der Technik unvermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden. Nach § 24 Satz 1 des BImSchG kann die zuständige Behörde im Einzelfall die zur Durchführung des § 22 und der auf dieses Gesetz gestützten Rechtsverordnungen erforderlichen Anordnungen treffen. Damit ist der Behörde zur Umsetzung von gegebenenfalls nicht vorgenommenen Minimierungsmaßnahmen ein Entschließungsermessen eingeräumt („kann“). Die Behörde hat aber auch ein Auswahlermessen, denn § 22 des BImSchG spricht von der Beschränkung der schädlichen Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß und § 24 des BImSchG lässt offen, welche zur Durchführung des § 22 des BImSchG erforderlichen Anordnungen zu treffen sind. Erst die 26. BImSchVVwV stellt Minimierungsmöglichkeiten zur Auswahl und bewertet diese. Dementsprechend formuliert Abschnitt 1 Absatz 4 der 26. BImSchVVwV: *„Die allgemeine Verwaltungsvorschrift dient der zuständigen Behörde als Entscheidungsgrundlage, ob die Minimierung der Felder unter Berücksichtigung von Gegebenheiten im Einwirkungsbereich der jeweiligen Anlage sachgerecht geplant und umgesetzt wird“*.

Im gerichtlichen Verfahren ist die Überprüfung behördlicher Ermessensentscheidungen in § 114 Satz 1 der Verwaltungsgerichtsordnung (VwGO) geregelt: *„Soweit die Verwaltungsbehörde ermächtigt*

⁶¹Pautsch in [64] § 40 Rz. 5; Riese in [44] § 114 Rz. 17, Stand Februar 2019.

⁶²Sogenannte Ermessensreduzierung auf Null; vergleiche beispielsweise Pautsch in [64] § 40 Rz. 18; zu den Sonderformen Sollvorschrift und *„intendiertes Ermessen“* siehe Riese in [44] § 114 Rz. 24 ff. und 27 ff., Stand Februar 2019.

⁶³Stuhlfauth in [65] § 114 Rz. 6; Riese in [44] § 114 Rz. 19, Stand Februar 2019.

ist, nach ihrem Ermessen zu handeln, prüft das Gericht auch, ob der Verwaltungsakt oder die Ablehnung oder Unterlassung des Verwaltungsakts rechtswidrig ist, weil die gesetzlichen Grenzen des Ermessens überschritten sind oder von dem Ermessen in einer dem Zweck der Ermächtigung nicht entsprechenden Weise Gebrauch gemacht ist“. Dementsprechend unterliegt das behördliche Ermessen im verwaltungsgerichtlichen Verfahren keiner Zweckmäßigkeitprüfung, sondern nur einer Rechtmäßigkeitprüfung im Hinblick auf das Vorliegen von Ermessensfehlern⁶⁴.

5.2.1.2 Ermessensfehler

Die Terminologie der Ermessensfehler ist nicht einheitlich⁶⁵, die „richtige“ oder „falsche“ Einordnung des Ermessensfehlers zieht aber keine Rechtsfolge nach sich⁶⁶. Für Zwecke dieser Arbeit wird die im Folgenden dargestellte Kategorisierung zu Grunde gelegt (nach Müller in [66] § 40 Rz. 25 ff.):

- Ein **Ermessensnichtgebrauch** oder **Ermessensausfall** liegt vor, wenn die Behörde das bestehende Ermessen nicht ausübt, weil sie es nicht erkennt oder sich gebunden fühlt, von einer Ermessensreduzierung auf Null ausgeht oder eine (in Wirklichkeit nicht vorliegende) Selbstbindung annimmt⁶⁷.
- Von einer **Ermessensunterschreitung** spricht man, wenn die Behörde den ihr gesetzlich eingeräumten Rahmen verkennt, „also nicht alle ihr zustehenden Möglichkeiten bei der Entscheidung erfasst und/oder berücksichtigt“ (Müller in [66] § 40 Rz. 26).
- Eine **Ermessensüberschreitung** liegt vor, wenn die Behörde eine Rechtsfolge trifft, die nicht mehr von der Ermessensermächtigung umfasst ist⁶⁸. Zu den rechtlichen Grenzen gehören insoweit auch die verfassungsrechtlichen Vorgaben, vor allem die Grundrechte, das Gleichheitsgebot und der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit ([67] S. 118). Hinsichtlich des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit⁶⁹ wird aus Gründen der Übersichtlichkeit im Rahmen dieser Arbeit ein eigener Prüfungspunkt gewählt.
- Von einem **Ermessensfehlgebrauch**⁷⁰ ist auszugehen, wenn die Behörde zwar die äußeren Grenzen der Ermächtigungsvorschriften einhält, aber die gesetzlichen Zielvorstellungen der Vorschrift nicht beachtet⁷¹. Dies ist der Fall, wenn die Behörde in ihre Entscheidung nicht alle wesentlichen Punkte einbezieht⁷² oder vom Ermessen in einer nicht dem Zweck der

⁶⁴Beispielsweise BVerwG, Urteil vom 13. September 2005 – 1 C 7/04 –, BVerwGE 124, 217, Rz. 13.

⁶⁵[50] S. 603 f.; zur Dreiteilungs- bzw. Vierteilungslehre Riese in [44] § 114 Rz. 56, Stand Februar 2019.

⁶⁶Vergleiche auch [40] § 17 Rz. 60 ohne Einordnung der Ermessensfehler.

⁶⁷Beispielsweise Müller in [66] § 40 Rz. 25; Riese in [44] § 114 Rz. 60, Stand Februar 2019.

⁶⁸Vergleiche Müller in [66] § 40 Rz. 29; Riese in [44] § 114 Rz. 63, Stand Februar 2019; beispielsweise auch BVerwG, Beschluss vom 5. Mai 2014 – 6 B 46/13 –, NVwZ 2014, 1034, Rz. 11.

⁶⁹Zur Prüfung der Verhältnismäßigkeit als gesetzliche Ermessensgrenze siehe BVerwG, Urteil vom 22. Februar 2017 – 1 C 27/16 –, BVerwGE 157, 356, Rz. 5.

⁷⁰Der Begriff Ermessensmissbrauch wird als Unterfall des Ermessensfehlgebrauchs auf willkürliches behördliches Handeln angewandt, vergleiche Riese in [44] § 114 Rz. 64, Stand Februar 2019.

⁷¹Vergleiche Müller in [66] § 40 Rz. 28; so auch Pautsch in [64] § 40 Rz. 20.

⁷²Sogenanntes Ermessensdefizit, beispielsweise wenn sie „den Sachverhalt nicht vollständig oder nicht ordnungsgemäß ermittelt hat und deshalb nicht alle für ihre Entscheidung relevanten Tatsachen kennt oder nicht vorliegende Tatsachen fälschlich annimmt“ (Müller in [66] § 40 Rz. 28); vergleiche auch BVerwG, Urteil vom 17. August 2016

Ermächtigung entsprechenden Weise Gebrauch macht, also sachfremde Erwägungen in ihre Entscheidung einbezieht⁷³.

- Einen besonderen Fall der Ermessensüberschreitung stellt, wie oben erwähnt, ein Verstoß gegen den **Grundsatz der Verhältnismäßigkeit** dar. Vereinfacht gesagt ist eine staatliche Maßnahme verhältnismäßig, wenn sie⁷⁴:
 1. einen legitimen Zweck hat⁷⁵,
 2. geeignet ist⁷⁶,
 3. erforderlich ist⁷⁷ und
 4. angemessen ist⁷⁸. Zur Prüfung der Angemessenheit sind die sich gegenüber stehenden (Rechts-)Positionen, nämlich die durch den Eingriff belasteten und die zu dessen Rechtfertigung bemühten, zunächst nach (abstrakter) Gewichtigkeit abzuwägen. Danach ist *„die konkrete ‚Intensität der Gefährdung‘ des Rechtsguts, das durch den Grundrechtseingriff geschützt werden soll, der ‚Schwere der Beeinträchtigung‘ (Kriterien: Häufigkeit, Dauer und Ausmaß) des nachteilig betroffenen Freiheitsrechts gegenüberzustellen. ‚Je schwerwiegender eine Grundrechtseinschränkung ist, desto gewichtiger muss auch das mit der Regelung zu erreichende Ziel sein‘“*⁷⁹.

5.2.1.3 Ermessenslenkende Verwaltungsvorschriften

Ermessenslenkende Verwaltungsvorschriften enthalten abstrakte Vorgaben dazu, in welcher Weise von dem der Verwaltung eingeräumten Ermessen Gebrauch gemacht werden soll (Riese in [44] § 114 Rz. 74, Stand Februar 2019). Ziel ist eine einheitliche und gleichmäßige Ermessensausübung⁸⁰. Ermessenslenkenden Verwaltungsvorschriften fehlt die unmittelbare Außenwirkung (Riese in [44] § 114 Rz. 76, Stand Februar 2019). Eine über die verwaltungsinterne Bindung hinausgehende anspruchsbegründende Außenwirkung wird nur durch den Gleichheitssatz (Art. 3 Abs. 1 des GG) und das im Rechtsstaatsprinzip verankerte Gebot des Vertrauensschutzes (Art. 20 und Art. 28 des

– 6 C 24/15 –, BVerwGE 156, 59, Rz. 33, betreffend den Fall des Ausgehens der Behörde von in Wahrheit nicht vorliegenden rechtlichen Voraussetzungen.

⁷³Ausführlich zu den sachfremden Gründen Sachs in [45] § 40 Rz. 64 ff.

⁷⁴Ständige Rechtsprechung, beispielsweise BVerfG, Urteil vom 27. Februar 2008 – 1 BvR 370/07 –, BVerfGE 120, 274, Rz. 218; aus der Literatur beispielsweise [68] S. 579.

⁷⁵Legitim ist der Zweck, wenn er auf das Wohl der Allgemeinheit gerichtet ist beziehungsweise auf ein öffentliches „Interesse, das verfassungsrechtlich nicht ausgeschlossen ist“, BVerfG, Beschluss vom 4. November 2009 – 1 BvR 2150/08 –, BVerfGE 124, 300, Rz. 71.

⁷⁶Das – legitime – Mittel ist dann geeignet, wenn der damit verfolgte Zweck überhaupt erreicht oder die Wahrscheinlichkeit, ihn zu erreichen, erhöht wird, beispielsweise BVerfG, Beschluss vom 18. Dezember 2018 – 1 BvR 142/15 –, BVerfGE 150, 244, Rz. 86.

⁷⁷Das gewählte Mittel ist dann erforderlich, wenn es keine mildere Maßnahme gibt, die denselben Erfolg mit gleicher Sicherheit und einem vergleichbaren Aufwand erzielt, vergleiche beispielsweise [40] § 17 Rz. 43.

⁷⁸Die Maßnahme ist angemessen, wenn der beabsichtigte Zweck nicht außer Verhältnis zu der Schwere des Eingriffs steht, vergleiche hierzu ausführlich im Rahmen des § 17 [40] § 17 Rz. 44-49.

⁷⁹[69] S. 153; vergleiche auch [68] S. 580.

⁸⁰Beispielsweise BayVG, Beschluss vom 15. September 2010 – 14 ZB 10.715 –, juris, Rz. 6; [40] § 48 Rz. 1; Riese in [44] § 114 Rz. 74, Stand Februar 2019.

GG) erreicht⁸¹, dies zudem nur in der Ausprägung, die die Verwaltungsvorschriften durch die ständige Verwaltungspraxis gefunden haben (Riese in [44] § 114 Rz. 76, Stand Februar 2019). Auf den Gleichheitsgrundsatz kann man sich nicht berufen, „wenn die Richtlinie gegen gesetzliche Vorgaben verstößt“⁸².

Der gerichtlichen Kontrolle unterliegt jedoch immer nur eine Ermessensentscheidung der Verwaltung in einem konkreten Einzelfall (Stuhlfauth in [65] § 114 Rz. 16). „Die Einbeziehung von Richtlinien in die Rechtmäßigkeitskontrolle dient lediglich der Konturierung des einschlägigen Verwaltungshandelns“ (Riese in [44] § 114 Rz. 76, Stand Februar 2019).

5.2.1.4 Rechtsprechung und Literatur zu Abschnitt 3.2.3 der 26. BImSchVVwV

Rechtsprechung zu einer etwaigen ermessenslenkenden Eigenschaft gegebenenfalls von Teilen der 26. BImSchVVwV ist nicht ersichtlich. Lediglich beiläufig hat das BVerwG in einem jüngeren Urteil erwähnt, dass auch die 26. BImSchVVwV bei den einzelnen technischen Maßnahmen zur Minimierung jeweils auf Beschränkungen und Gegengründe verweist und damit keine Vorsorge vor Immissionen durch elektromagnetische Felder „um jeden Preis“ verlangt⁸³. Dies deutet auf die Abwägung mit weiteren Rechtsgütern bei der Auswahl der Minimierungsmaßnahmen hin.

Die Literatur hat, soweit ersichtlich, über die Einordnung bestimmter Teile der 26. BImSchVVwV als ermessenslenkende Verwaltungsvorschrift noch nicht diskutiert. Allerdings wird darauf verwiesen, dass jedenfalls die TA Luft und TA Lärm, deren normkonkretisierende Eigenschaft in Teilen unstrittig ist, auch ermessenslenkende Teile enthalten⁸⁴. Dies – nämlich die ermessenslenkende Eigenschaft von Teilen – gilt möglicherweise auch für die 26. BImSchVVwV.

5.2.2 Ermessenslenkende Eigenschaft von Abschnitt 3.2.3 der 26. BImSchVVwV

Im Folgenden soll die ermessenslenkende Eigenschaft von Abschnitt 3.2.3 der 26. BImSchVVwV geprüft und herausgearbeitet werden, ob im Hinblick auf die Einbeziehung der als technisch unwirksam erkannten Minimierungsmaßnahmen Ermessensfehler vorliegen.

5.2.2.1 Inhaltliche Bewertung

In Abschnitt 3.2.3 der 26. BImSchVVwV werden die nach Abschnitt 5 (und auch nach einem bestimmten Verfahren gemäß den Abschnitten 3.2.1, 3.2.2 und 4 der 26. BImSchVVwV) gefundenen

⁸¹Vergleiche BVerwG, Urteil vom 8. April 1997 – 3 C 6/95 –, BVerwGE 104, 220, Rz. 19.

⁸²„Keine Gleichheit im Unrecht“, Riese in [44] § 114 Rz. 76, Stand Februar 2019.

⁸³BVerwG, Urteil vom 14. März 2018 – 4 A 5/17 –, BVerwGE 161, 263, Rz. 49.

⁸⁴Nämlich betreffend die Ermessensausübung bei der Sachverhaltsaufklärung und die Anwendung von Eingriffsermächtigungen mit Ermessensspielraum wie nach § 24 des BImSchG, so Hansmann in [42] TA Lärm Vorbemerkung Rz. 5, Stand Dezember 2006; sowie detailliert zur TA Luft Hansmann in [42] TA Luft Vorbemerkung Rz. 3, Stand April 2004; ermessenslenkend hinsichtlich der Anwendung des § 24 des BImSchG ist Nummer 5.2. der TA Lärm nach [40] § 24 Rz. 20; ermessenslenkend sind weiter die Nummern 5.2, 5.3 der TA Lärm, siehe Czajka in [49] § 24 Rz. 27, oder die Nummern 6.2.1 ff. der TA Luft, siehe Czajka in [49] § 17 Rz. 66; Nummer 5.1 Abs. 3 der TA Lärm ist sowohl normkonkretisierend wie auch ermessenslenkend nach Czajka in [49] § 17 Rz. 66.

Minimierungsmaßnahmen bewertet, um dann die endgültig auszuführenden Minimierungsmaßnahmen festzulegen. Hierfür geht der Vorschriftengeber von den ermittelten technischen Möglichkeiten zur Minimierung aus und unterwirft diese verschiedenen Bewertungs- und Abwägungskriterien, um so die endgültige Auswahl (Festlegung) der Minimierungsmaßnahmen zu steuern. Dies ist der typische Regelungsgehalt ermessenslenkender Verwaltungsvorschriften. Die gewählten Formulierungen in Abschnitt 3.2.3 der 26. BImSchVVwV bekräftigen diese Einordnung, weil sie auch die zum Grundsatz der Verhältnismäßigkeit gefundenen Kriterien enthalten, um eine Ermessensüberschreitung zu verhindern.

Nach Abschnitt 3.2.3 Absatz 1 der 26. BImSchVVwV ist im *„letzten Teilschritt Maßnahmenbewertung [...] die Verhältnismäßigkeit der ermittelten technischen Möglichkeiten zur Minimierung zu bewerten. In die Bewertung mit einzubeziehen sind zum Beispiel die Wirksamkeit der Maßnahmen, die Auswirkung auf die Gesamtimmission an den maßgeblichen Minimierungsorten, die zu erreichende Immissionsreduzierung an den maßgeblichen Minimierungsorten, die Investitions- und Betriebskosten der Maßnahmen sowie die Auswirkungen auf die Wartung und Verfügbarkeit der Anlagen“*. Der Einleitungssatz gibt das Grundprinzip der Verhältnismäßigkeit bei einem Abwägungsvorgang wieder. Mit der beispielhaften Aufzählung der in die Bewertung einzubeziehenden Faktoren bezieht sich Satz 2 zum einen auf das Erfordernis der Geeignetheit des Mittels, nämlich wörtlich *„die Wirksamkeit der Maßnahmen“*, aber auch detaillierter auf die Auswirkung der Maßnahmen auf die Gesamtimmission an den maßgeblichen Minimierungsorten und die zu erreichende Immissionsreduzierung an den maßgeblichen Minimierungsorten. Zum anderen verweist Satz 2 darauf, dass die Investitions- und Betriebskosten der Maßnahmen sowie die Auswirkungen auf die Wartung und Verfügbarkeit der Anlagen, also die Wirtschaftlichkeit der beabsichtigten Maßnahmen, auch in die Bewertung einfließen sollen (Angemessenheit der Maßnahme).

Nach Absatz 2 *„kommen nur Maßnahmen in Betracht, die mit generell vertretbarem wirtschaftlichen Aufwand und Nutzen umgesetzt werden können. Dieser Aufwand kann erheblich davon abhängen, ob eine Minimierungsmaßnahme auf die gesamte Anlage oder nur auf einen Teil, zum Beispiel einen Leitungsabschnitt, angewendet wird. Bei wesentlichen Änderungen ist der zusätzliche Aufwand auch von Art und Umfang der geplanten wesentlichen Änderung selbst abhängig und kann im Vergleich zu einem Neubau erheblich sein“*. Mit dieser Formulierung wird der Gedanke der Wirtschaftlichkeit nochmals deutlich in den Vordergrund gestellt.

Laut Absatz 3 sind bei *„der Auswahl der in Betracht kommenden Minimierungsmaßnahmen [...] zudem mögliche nachteilige Auswirkungen auf andere Schutzgüter zu berücksichtigen. Hierbei sind zum einen sämtliche fachrechtlichen Vorgaben, zum Beispiel die Regelungen des Naturschutzes, insbesondere des Gebiets- und Artenschutzes, die Regelungen der TA Lärm oder des Arbeitsschutzes, zu beachten. Zum anderen ist eine umfassende, integrierte Betrachtung geboten mit der Folge, dass Minimierungsmaßnahmen aufgrund der mit ihnen verbundenen nachteiligen Auswirkungen auf andere Schutzgüter ausscheiden können“*. Mit diesen Anforderungen wird auf das Erfordernis der Angemessenheit der Maßnahme (die Maßnahme ist angemessen, wenn der beabsichtigte Zweck nicht außer Verhältnis zu der Schwere des Eingriffs steht) hingewiesen.

Diese vorgenannten Verhaltensanweisungen sollen damit erkennbar die Ermessensausübung lenken und eine Ermessensüberschreitung verhindern.

5.2.2.2 Mögliche Ermessensfehler durch Einbeziehung ungeeigneter Maßnahmen

In den vorstehenden Kapiteln wurde erkannt, dass die von der 26. BImSchVVwV vorgesehenen Minimierungsmaßnahmen zumeist grundsätzlich wirksam sind, ihrer Realisierung jedoch vielfach andere Gründe entgegenstehen. Es existieren allerdings auch Minimierungsmaßnahmen, die, entgegen den Aussagen des Abschnitts 5 der 26. BImSchVVwV, unter Umständen keine oder eine gegenteilige Wirkung aufweisen können. Wie in Abschnitt 3.3 dargestellt, ist die Erhöhung des Mastes bei Maststationen eine wirkungslose Minimierungsmaßnahme. Die Verringerung des System-Achsabstandes von Erdkabeln hat bei einigen Phasenanordnungen gegenteilige Wirkung (siehe Abschnitt 3.2.3); dasselbe gilt bei der Mitteneinspeisung auf der Niederspannungs-Sammelschiene der Fertigstation Typ 4227 in einem kleinen Teil des Einwirkungsbereiches (siehe Abschnitt 3.3.2).

Da die vorgenannten Maßnahmen technisch in vielen Fällen ungeeignet sind, wird bei der Einbeziehung der Maßnahmen in die Ermessensausübung der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit verletzt. Denn, wie dargestellt, ist eine Maßnahme unter anderem nur verhältnismäßig, wenn sie geeignet ist, also der mit der Maßnahme verfolgte Zweck überhaupt erreicht oder die Wahrscheinlichkeit, ihn zu erreichen, erhöht wird. Die Einstellung ungeeigneter Maßnahmen in die Ermessensabwägung macht die Ermessensausübung damit grundsätzlich fehlerhaft.

Aus der normkonkretisierenden Eigenschaft des Abschnittes 5 der 26. BImSchVVwV folgt aber die rechtliche Bindungswirkung der darin getroffenen Einschätzung der Wirksamkeit der Maßnahmen. Damit ist zum einen die Behörde an diese Einschätzung gebunden; zum anderen darf ein ange-rufenes Gericht die Wirksamkeit der Maßnahmen nicht überprüfen. Im Ergebnis sind deshalb die oben genannten Maßnahmen dennoch als wirksam und damit als geeignet im Sinne des Verhältnismäßigkeitsgrundsatzes anzusehen; eine Ermessensausübung unter ihrer Einbeziehung ist nicht fehlerhaft.

5.2.3 Ergebnis

Die 26. BImSchVVwV ist in Abschnitt 3.2.3 ermessenslenkend. Aufgrund der normkonkretisierenden Eigenschaft des Abschnittes 5 führt die Übernahme ungeeigneter Maßnahmen in die Ermessenserwägungen jedoch nicht zu einer fehlerhaften Ermessensausübung.

5.3 Folgen für den verwaltungsgerichtlichen Rechtsschutz

Im Folgenden sollen die Auswirkungen der bisher getroffenen Feststellungen zur 26. BImSchVVwV auf beispielhafte Konstellationen von Rechtsstreitigkeiten, in denen durch verschiedene Kläger ein Mehr oder ein Weniger an Minimierung begehrt wird, in aller Kürze betrachtet werden.

5.3.1 Szenarien

Ein denkbarer Sachverhalt ist beispielsweise, dass sich ein Netzbetreiber (Vorhabenträger) gegen behördlich angeordnete Minimierungsmaßnahmen im Einzelfall⁸⁵ zur Wehr setzt⁸⁶. Denn nach § 24 Satz 1 des BImSchG kann die zuständige Behörde im Einzelfall die zur Durchführung des § 22 und der auf dieses Gesetz gestützten Rechtsverordnungen erforderlichen Anordnungen treffen. Dies schließt die Durchsetzung des § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV⁸⁷ ein und muss deshalb auch die aufgrund § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV erlassene 26. BImSchVVwV umfassen. Weitere denkbare Szenarien sind, dass Eigentümer betroffener Grundstücke oder immissionsschutzrechtliche Nachbarn⁸⁸ (zusätzliche) Minimierungsmaßnahmen durch Erlass von Anordnungen nach § 24 Satz 1 des BImSchG⁸⁹ begehren⁹⁰.

5.3.2 Klagebefugnis

Voraussetzung für eine zulässige Klage ist unter anderem, dass der Kläger klagebefugt nach § 42 Abs. 2 der VwGO ist. Danach ist, soweit gesetzlich nichts anderes bestimmt, die Klage nur zulässig, wenn der Kläger geltend macht, durch den Verwaltungsakt oder seine Ablehnung oder Unterlassung in seinen Rechten verletzt zu sein.

Ist der Kläger Adressat eines Verwaltungsaktes, der ihm ein Handeln gebietet, ist nach der Adressatentheorie stets die Möglichkeit einer Rechtsverletzung gegeben⁹¹. Die Klagebefugnis von Betreibern von Anlagen, denen gegenüber eine belastende Anordnung nach § 24 des BImSchG ergeht, ist in der Rechtsprechung nicht bezweifelt worden⁹².

Begehrt ein Dritter eine Minimierung elektrischer und/oder magnetischer Felder, muss er ebenfalls gemäß § 42 Abs. 2 VwGO klagebefugt sein. Als Nichtadressat von Verwaltungsakten muss sich der Dritte insoweit auf drittschützende Normen berufen können⁹³. Der drittschützende Charakter des § 22 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 und 2 des BImSchG wird bejaht, soweit die Regelungen der Verhinderung oder Beschränkung schädlicher Umwelteinwirkungen dienen⁹⁴. *„Drittbetroffene können sich [auch] auf Verwaltungsvorschriften nach § 48 [des BImSchG] berufen, soweit sie Rechtsnormen konkreti-*

⁸⁵Auf Normenkontrollklagen nach § 47 der VwGO wird im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

⁸⁶Planfeststellungsbeschlüsse und die in diesem Zusammenhang möglichen Einschränkungen sollen im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden.

⁸⁷Allgemein zur Durchsetzung der auf Grund des BImSchG erlassenen Rechtsverordnungen [40] § 24 Rz. 7.

⁸⁸„Zur Nachbarschaft gehören [...] nur solche Personen, die nach ihren Lebensumständen den Einwirkungen der Anlage in einer vergleichbaren Weise, wie sie der Wohnort vermittelt, ausgesetzt sind“, BVerwG, Urteil vom 22. Oktober 1982 – 7 C 50/78 –, DVBl 1983, 183, Rz. 13.

⁸⁹Planfeststellungsbeschlüsse und damit zusammenhängende Begehren Dritter sollen auch hier nicht betrachtet werden.

⁹⁰Siehe für den vergleichbaren Fall des § 17 [40] § 17 Rz. 83.

⁹¹Beispielsweise [47] § 8 Rz. 41; Czajka in [49] § 24 Rz. 41; differenziert R. P. Schenke in [55] § 42 Rz. 65 ff. und Rz. 78 ff. und Wahl/Schütz in [44] § 42 Abs. 2 Rz. 48 f., Stand Januar 2020.

⁹²Beispielsweise VG Ansbach, Beschluss vom 18. Juli 2000 – AN 21 K 99.01672 –, juris, Rz. 21; und Urteil vom 20. Oktober 2010 – AN 11 K 10.00998 –, juris, Rz. 23, allerdings nicht zu Minimierungsmaßnahmen elektrischer/magnetischer Felder.

⁹³Vergleiche statt vieler Wahl/Schütz in [44] § 42 Abs. 2 Rz. 50, Stand Januar 2020; zur Klagebefugnis von Umweltschutzverbänden siehe [40] § 24 Rz. 24.

⁹⁴Vergleiche Czajka in [49] § 24 Rz. 43 und auch [40] § 24 Rz. 23.

sieren, die als drittschützend anzusehen sind“⁹⁵. Von einer drittschützenden Wirkung des § 4 Abs. 2 der 26. BImSchV ist die Rechtsprechung jedenfalls ausgegangen⁹⁶. Dies muss daher auch für die darauf beruhende 26. BImSchVVwV gelten.

„Soweit § 24 der Konkretisierung oder der Durchsetzung drittschützender Normen dient, hat diese Vorschrift selbst drittschützenden Charakter“ (Czajka in [49] § 24 Rz. 43). Auch ein Anspruch auf fehlerfreie Ermessensausübung besteht „nur insoweit, als die Rechtsvorschrift, die zur Ermessensausübung ermächtigt, (zumindest auch) den individuellen Interessen des Klägers zu dienen bestimmt ist“⁹⁷.

Gerade weil § 24 des BImSchG eine Ermessensvorschrift ist⁹⁸, kann ein Dritter regelmäßig nicht den Erlass einer konkret bezeichneten Anordnung verlangen⁹⁹, sondern hat wegen § 113 Abs. 5 Satz 2 der VwGO lediglich ein (subjektives) Recht auf fehlerfreien Ermessensgebrauch ([40] § 24 Rz. 23), also darauf, dass die Behörde verpflichtet wird, das Ermessen unter Beachtung der Rechtsauffassung des Gerichts pflichtgemäß auszuüben (Riese in [44] § 114 Rz. 72, Stand Februar 2019).

5.3.3 Erfolgsaussichten

Wenn eine Klage erfolgreich ist, weil der angefochtene Verwaltungsakt rechtswidrig und der Kläger dadurch in seinen Rechten verletzt ist, hebt das Gericht den Verwaltungsakt (und den etwaigen Widerspruchsbescheid) gemäß § 113 Abs. 1 Satz 1 der VwGO auf. Bei rechtswidriger Ablehnung oder Unterlassung eines Verwaltungsaktes spricht das Gericht die Verpflichtung der Behörde aus, die beantragte Amtshandlung vorzunehmen, wenn die Sache spruchreif ist (§ 113 Abs. 5 Satz 1 der VwGO); andernfalls spricht es die Verpflichtung aus, den Kläger unter Beachtung der Rechtsauffassung des Gerichts zu bescheiden (§ 113 Abs. 5 Satz 2 der VwGO). Soweit die Verwaltungsbehörde ermächtigt ist, nach ihrem Ermessen zu handeln, prüft das Gericht auch, ob der Verwaltungsakt oder die Ablehnung oder Unterlassung des Verwaltungsakts rechtswidrig ist, weil die gesetzlichen Grenzen des Ermessens überschritten sind oder von dem Ermessen in einer dem Zweck der Ermächtigung nicht entsprechenden Weise Gebrauch gemacht ist (§ 114 Satz 1 der VwGO).

Liegt also ein Verwaltungsakt vor, mit dem eine Behörde nicht geeignete Maßnahmen entweder anordnet oder auch nur in ihre Ermessensausübung einbezieht, kann der Kläger grundsätzlich eine fehlerhafte Ermessensausübung rügen. Jedoch ist bei der materiell-rechtlichen Prüfung, ob ein Verstoß gegen das Minimierungsgebot nach der 26. BImSchVVwV vorliegt, die gerichtliche Kontroll-dichte – wie dargestellt – wegen des Vorliegens von normkonkretisierenden und ermessenslenkenden Verwaltungsvorschriften reduziert.

Folglich kann nach hier vertretener Auffassung der Kläger nicht verlangen, dass, beispielsweise durch Einholung eines Gutachtens, andere als die in Abschnitt 5 der 26. BImSchVVwV aufgezähl-

⁹⁵[40] § 48 Rz. 65 mit weiteren Nachweisen.

⁹⁶Beispielsweise BVerwG, Urteil vom 22. Juni 2017 – 4 A 18/16 –, NVwZ 2018, 332, Rz. 40, bei einer Klage einer Immissionsschutzrechtlichen Nachbarin gegen einen Planfeststellungsbeschluss.

⁹⁷Wahl/Schütz in [44] § 42 Abs. 2 Rz. 85, Stand Januar 2020; R.P. Schenke in [55] § 42 Rz. 93.

⁹⁸„Die zuständige Behörde kann [...]“.

⁹⁹Außer bei Ermessensreduzierung auf Null, beispielsweise wenn dem Nachbarn besonders schwere Schäden drohen ([40] § 24 Rz. 23), was nach gegenwärtigem wissenschaftlichem Kenntnisstand unterhalb der Grenzwerte auszuschließen ist (siehe Abschnitt 2.6).

ten Minimierungsmaßnahmen geprüft werden oder deren Wirksamkeit anders als in Abschnitt 5 der 26. BImSchVVwV dargestellt gewürdigt wird. Vielmehr steht zum einen der Katalog wirksamer Minimierungsmaßnahmen fest. Weil zum anderen die Einschätzung der Wirksamkeit der in Abschnitt 5 der 26. BImSchVVwV dargestellten Maßnahmen bindend ist, führt auch deren Einbeziehung in die Ermessensausübung oder gar deren Auswahl nicht zur Fehlerhaftigkeit der Ermessensausübung. Klagen wären insoweit erfolglos.

Als Ausblick sei an dieser Stelle hinzugefügt, dass, wenn es sich bei Abschnitt 5 der 26. BImSchVVwV „lediglich“ um eine ermessenslenkende Verwaltungsvorschrift handelte, also die Feststellung der Wirksamkeit der oben genannten, als unwirksam erkannten Minimierungsmaßnahmen nicht bindend wäre, die Einbeziehung dieser Maßnahmen in die Ermessensausübung einen Ermessensfehler zur Folge hätte, der zum Erfolg einer dagegen gerichteten Anfechtungsklage bzw. Klage auf Verbescheidung führen könnte.

6 Verschiedene Aspekte zur Feldüberlagerung mehrerer Anlagen

Die zum 1. Januar 1997 in Kraft getretene Fassung der 26. BImSchV bestimmte in ihrem § 3, dass bei der Überprüfung der Grenzwerteinhaltung von Niederfrequenzanlagen auch die Immissionen anderer Niederfrequenzanlagen zu berücksichtigen sind. Dies bezog sich lediglich auf Anlagen mit $16\frac{2}{3}$ Hz (Bahnstrom) und 50 Hz Nennfrequenz. Im Jahr 2000 wurde die Sollfrequenz im deutschen, österreichischen und schweizerischen Bahnstromnetz auf 16,7 Hz geändert ([70] S. 41), sodass bei strenger Auslegung der 26. BImSchV von diesem Zeitpunkt an das Zusammenwirken von bahn- und netzfrequenten Feldern nicht mehr berücksichtigt werden musste.

Die Neufassung der 26. BImSchV im Jahr 2013 brachte diesbezüglich zwei wesentliche Änderungen: Zum einen war dies die Einführung einer durchgehenden Grenzwertkurve von 1 Hz bis 300 GHz, wobei die Grenzwerte an die neuen Empfehlungen der ICNIRP aus dem Jahr 2010 angepasst wurden (siehe Abschnitt 2.7.1). Zum anderen wurde, nachdem die Fassung der 26. BImSchV hierzu keine näheren Vorgaben gemacht hatte, eine Berechnungsvorschrift für die Überprüfung der Grenzwerteinhaltung bei Überlagerung von Feldern mehrerer Frequenzen eingeführt. Diese ist in Gleichung 6.1 für die elektrische Feldstärke und in Gleichung 6.2 für die magnetische Flussdichte dargestellt. Für jeden Immissionsbeitrag E_i bzw. B_i ist zu berechnen, inwieweit er den bei der betreffenden Frequenz geltenden Grenzwert $G_{E,i}$ bzw. $G_{B,i}$ ausschöpft. Die Summe dieser Ausschöpfungsgrade muss kleiner oder gleich eins sein. Eingedenk der Grenzen der verschiedenen biologischen Wirkmechanismen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder (siehe Abschnitt 2.6) sind die Immissionsbeiträge aller Niederfrequenzanlagen sowie ortsfester Hochfrequenzanlagen, die einer Standortbescheinigung nach §§ 4 und 5 der Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder (BEMFV) bedürfen, von 1 Hz bis 10 MHz zu berücksichtigen.

$$\sum_{1\text{ Hz}}^{10\text{ MHz}} \frac{E_i}{G_{E,i}} \leq 1 \quad (6.1)$$

$$\sum_{1\text{ Hz}}^{10\text{ MHz}} \frac{B_i}{G_{B,i}} \leq 1 \quad (6.2)$$

Diese betragsmäßige Summation der Grenzwert-Ausschöpfungsgrade der einzelnen Immissionsbeiträge steht in Einklang mit den Empfehlungen der ICNIRP und beruht auf der Annahme, dass sich die einzelnen Frequenzanteile der Feldstärken bzw. Flussdichten so addieren, dass ihre Maxima zusammenfallen und eine scharfe Spitze im zeitlichen Verlauf ergeben [9]. Dies stellt die ungünstigsten Umstände bei veränderlicher Phasenlage zwischen den einzelnen Frequenzanteilen dar.

Es soll im Folgenden am Beispiel des Zusammenwirkens von Feldern mit 16,7 und 50 Hz überprüft werden, ob diese betragsmäßige Summation verglichen mit der physikalisch korrekten Betrachtung der Frequenzüberlagerung einen übermäßig konservativen oder einen in der Praxis brauchbaren Ansatz darstellt. Ferner soll anhand der Modellierung eines Langwellensenders untersucht werden, inwieweit in dessen Umgebung mit einer nennenswerten Grenzwertausschöpfung durch die hochfrequenten Immissionsbeiträge und folglich mit geringeren zulässigen Feldstärken bzw. Flussdichten für eine etwaige 50-Hz-Anlage zu rechnen ist.

6.1 Niederfrequenz-Überlagerung

Neben dem öffentlichen Energieversorgungsnetz mit 50 Hz Nennfrequenz existiert in Deutschland als weitere nennenswerte, der 26. BImSchV unterliegende Niederfrequenzanlage lediglich das Bahnstromnetz mit 16,7 Hz Nennfrequenz. Innerhalb dieser und zwischen diesen Netzen ist eine Vielzahl an Konstellationen der Feldüberlagerung denkbar. Innerhalb eines Netzes wären dies auf 50-Hz-Seite beispielsweise ein Kombinationsmast mit Hoch- und Höchstspannungsstromkreisen oder die gemeinsame Verlegung von Mittel- und Hochspannungskabeln; bei den 16,7-Hz-Anlagen wäre eine Parallelführung einer 110-kV-Bahnstromleitung zu einer 15-kV-Oberleitung denkbar. All diesen Beispielen gemein ist, dass die Stromkreise der verschiedenen Spannungsebenen aufgrund des Verbundnetzes zwar dieselbe Frequenz, aber nicht zwingend dieselbe Phasenlage aufweisen. Letzteres liegt darin begründet, dass die Spannungsebenen über Transformatoren verbunden sind, die zum einen aufgrund ihrer Schaltgruppe eine konstante und zum anderen in Abhängigkeit von ihrer Belastung eine zusätzliche veränderliche Phasenverschiebung mit sich bringen. Die oben als ungünstigste Umstände erkannte Überlagerung der Maxima kann also durchaus auftreten.

Bei einer Überlagerung der Feldstärken bzw. Flussdichten unterschiedlicher Spannungsebenen dominiert die höhere Spannungsebene das elektrische Feld sowie aufgrund der in der Regel größeren Stromstärken auch die magnetische Flussdichte. Einen besonderen Fall zweier Feldquellen vergleichbarer Stärke stellt daher die Überlagerung der Felder einer 110-kV-Leitung des öffentlichen Netzes mit denen einer 110-kV-Bahnstromleitung dar. Da einerseits die Nennfrequenz des Bahnstromnetzes in keinem ganzzahligen Verhältnis zur Nennfrequenz des öffentlichen Netzes steht und andererseits die tatsächlichen Frequenzen in beiden Netzen unabhängig voneinander um den Nennwert schwanken, ist die Phasenlage beider Leitungen zueinander einer stetigen Veränderung unterworfen.

Im Folgenden sollen zum einen ein Kombinationsmast mit 16,7- und 50-Hz-Stromkreisen und zum anderen eine Parallelführung einer 110-kV-Bahnstromleitung mit einer 110-kV-Freileitung des öffentlichen Netzes hinsichtlich ihrer Feldverteilung untersucht werden. Der Kombinationsmast lehnt sich an die Einebene-Donau-Viersystem-Geometrie an, wobei auf der untersten Traverse jeweils die äußersten Leiterseile entfallen. In Tabelle 6.1 sind die zugehörigen Maßangaben aufgelistet, die freundlicherweise von der Bayernwerk Netz GmbH, Regensburg, bereitgestellt wurden. Im 110-kV-Bahnstromnetz gibt es zwei Phasen pro System mit einer Außenleiterspannung von 110 kV und einer Phasenverschiebung von 180°. Dies ergibt eine Leiter-Erde-Spannung von 55 kV, während das Drehstromnetz eine Leiter-Erde-Spannung von $110 \text{ kV} / \sqrt{3} \approx 63,5 \text{ kV}$ aufweist. Die Phasen des Bahnstromnetzes werden zur besseren Unterscheidung von den Drehstromsystemen mit „R“ (0°) und „T“ (180°) bezeichnet. In der alphabetisch aufsteigenden Nomenklatur dieser Arbeit ergibt

Tabelle 6.1: Maßangaben in m der Zweifrequenz-Viersystem-Geometrie (siehe Abbildung 3.7)

	a	b	c	d	e	f	g	h	i
Zweifrequenz-Viersystem	–	8,8	4,8	8,0	3,7	5,8	4,8	9,3	16,1

sich damit für den beispielhaft betrachteten Zweifrequenz-Viersystem-Mast eine Phasenordnung von 213/312/–RT/TR–, wobei mit „–“ die aufgrund des zweiphasigen Bahnstromsystems gegenüber der Drehstromkonfiguration entfallenden Leiterseile bezeichnet werden. Da die 16,7-Hz-Stromkreise eine geringfügig niedrigere Leiter-Erde-Spannung aufweisen und zudem bei dieser Frequenz im Vergleich zu 50 Hz die dreifache magnetische Flussdichte erlaubt ist, ist deren Führung auf der untersten Traverse im Hinblick auf eine möglichst geringe Ausschöpfung der Feldstärke- bzw. Flussdichtegrenzwerte zu bevorzugen (Abstandsoptimierung).

Für die Parallelführung einer 50-Hz- mit einer 16,7-Hz-Freileitung werden zwei Maste vom Typ Einebene-Zweisystem 100 angenommen, deren Trassenachsen 25 m voneinander entfernt sind. In den zugehörigen Diagrammen wird stets die Mitte der Trassenachsen als Nullpunkt verwendet, von dem aus die Trassenachsen der beiden Freileitungen folglich jeweils 12,5 m entfernt liegen. Auf der linken Seite soll dabei die 50-Hz-Leitung mit der Phasenbelegung 123/321 und auf der rechten Seite die 16,7-Hz-Leitung mit der Phasenbelegung –RT/TR– liegen. Bei letzterer entfallen gegenüber der Drehstromleitung jeweils die äußersten Leiterseile. Für eine korrekte Berechnung solcher mischfrequenten Anordnungen in WinField ist es nach Herstellerangaben wichtig, die automatischen Induktionsströme einzuschalten und die Frequenz entweder auf „FREE“ (für die vektorielle Überlagerung) oder auf den jeweils zu untersuchenden Wert (für die komponentenweise Betrachtung) einzustellen.

In beiden Fällen werden sowohl für die Drehstrom- wie für die Bahnstromsysteme Leiterseile vom Querschnitt 380/50 mm² Al/St mit 500 A Stromstärke (positive Flussrichtung) angenommen. Die Erdseile sind jeweils vom Typ 97/48 mm² Al/St. Die untersten Leiterseile liegen in 7 m Höhe über dem Erdboden.

Sowohl für den Zweifrequenz-Viersystem-Masten als auch für die Parallelführung werden die magnetische Flussdichte (Abbildungen 6.1 und 6.5) und die elektrische Feldstärke (Abbildungen 6.3 und 6.7) berechnet, die sich ergeben, wenn nur die Systeme jeweils einer Frequenz unter Strom bzw. unter Spannung stehen. Aus den Ergebnissen wird die betragsmäßige Summe gebildet. Erwartungsgemäß dominieren die unten liegenden 16,7-Hz-Leiterseile beim Zweifrequenz-Viersystem-Masten im Bereich bis etwa 20 m beiderseits der Trassenachse, doch in größerem Abstand kehrt sich dieses Verhältnis um, da die Feldstärke bzw. Flussdichte der 16,7-Hz-Leiterseile deutlich stärker abfällt als die der 50-Hz-Systeme. Bei der Parallelführung zeigt sich ein sehr ähnlicher, wenngleich horizontal verschobener Verlauf der 16,7-Hz- und der 50-Hz-Flussdichten bzw. -Feldstärken, wobei sich auch hier bei 16,7 Hz ein stärkerer Abfall mit zunehmender Entfernung zeigt als bei 50 Hz. Da die Mastgeometrien der beiden Leitungen bis auf die zwei fehlenden Leiterseile auf 16,7-Hz-Seite identisch sind, bietet sich ein Vergleich der Maximalwerte der Feldstärke und der Flussdichte an: dabei zeigt sich, dass die 50-Hz-Stromkreise sowohl bei der elektrischen Feldstärke als auch bei der magnetischen Flussdichte etwas höhere Maximalwerte erreichen als ihre Gegenstücke mit 16,7 Hz.

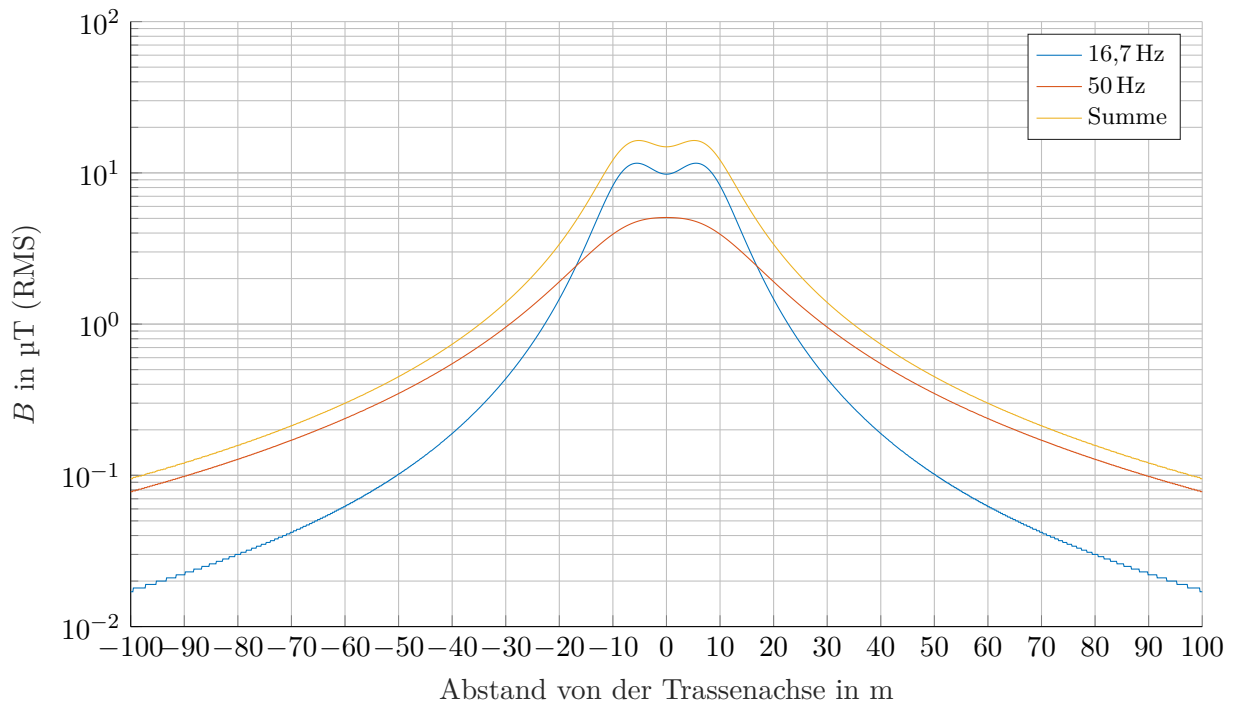


Abbildung 6.1: Frequenzabhängige Komponenten der mag. Flussdichte samt betragsmäßiger Addition beim Zweifrequenz-Viersystem-Mast

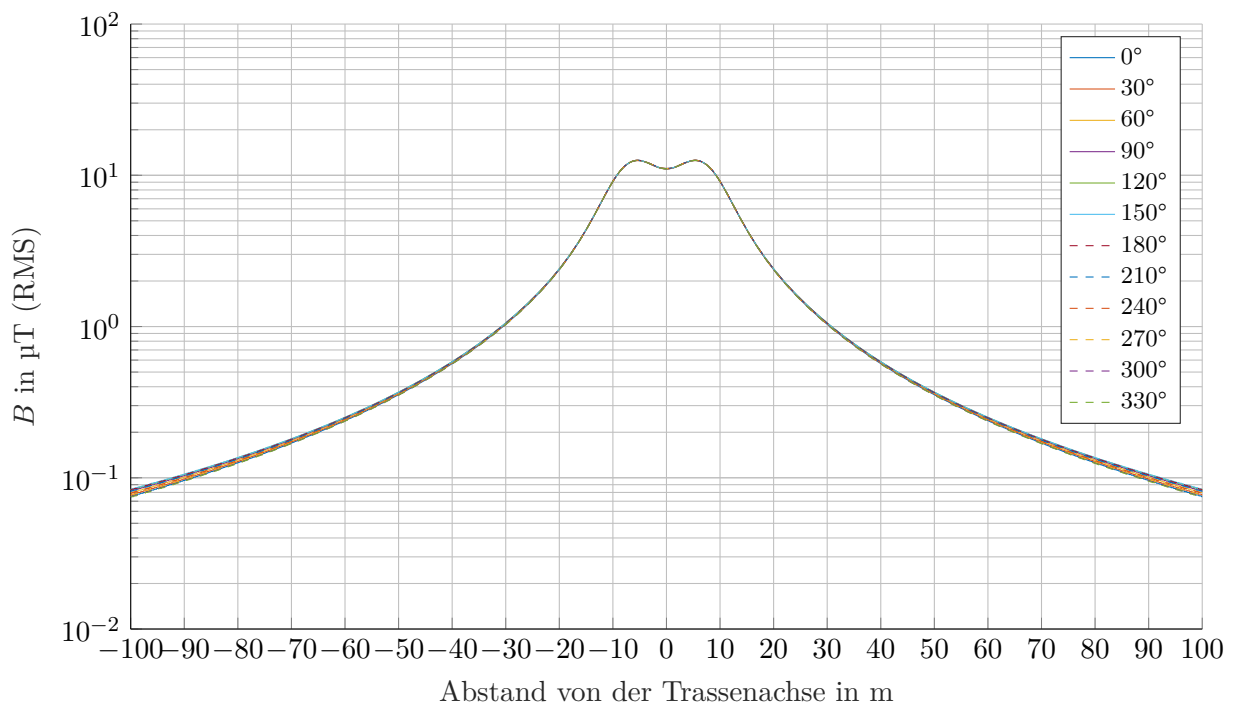


Abbildung 6.2: Vektorielle Summe der mag. Flussdichte beim Zweifrequenz-Viersystem-Mast in Abhängigkeit vom Phasenwinkel der Bahnstromkreise

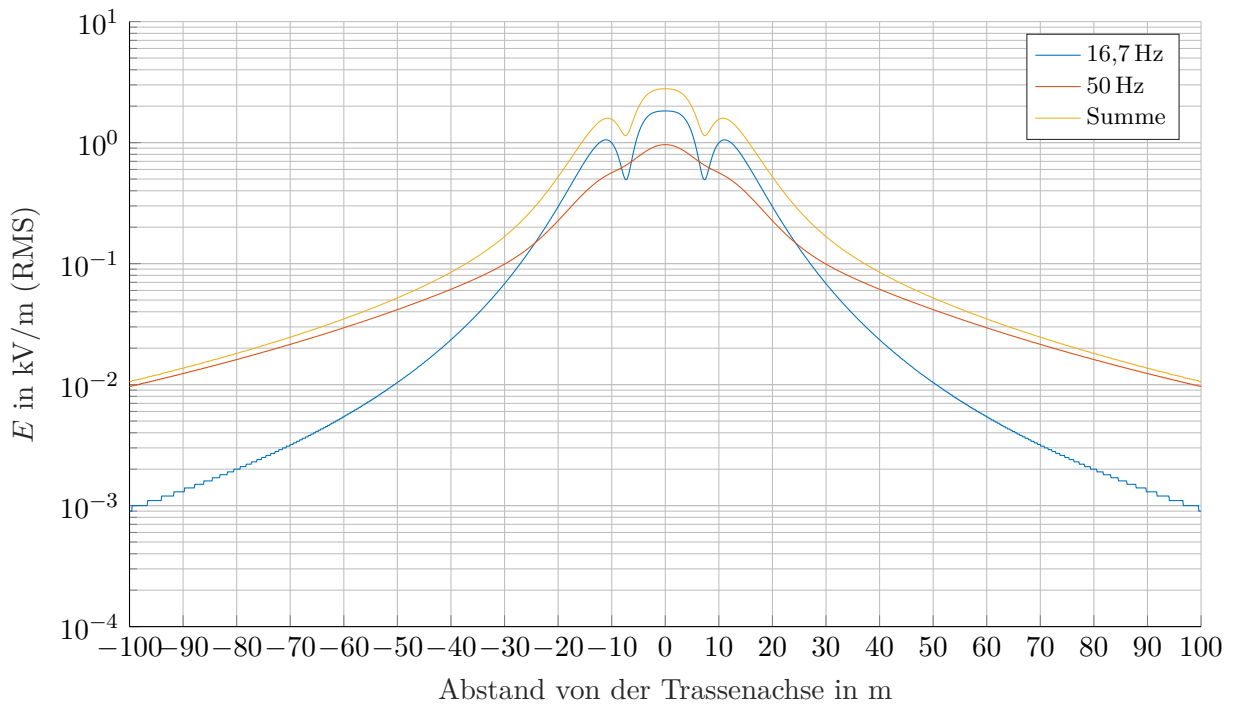


Abbildung 6.3: Frequenzabhängige Komponenten der el. Feldstärke samt betragsmäßiger Addition beim Zweifrequenz-Viersystem-Mast

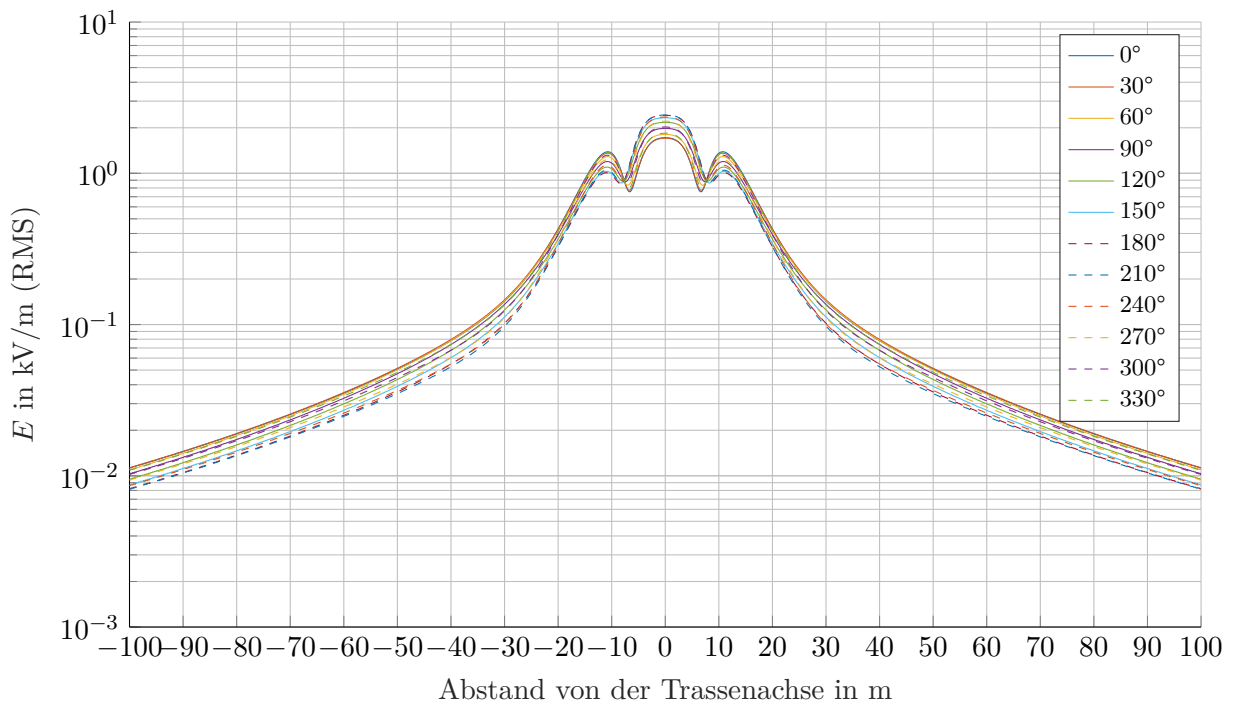


Abbildung 6.4: Vektorielle Summe der el. Feldstärke beim Zweifrequenz-Viersystem-Mast in Abhängigkeit vom Phasenwinkel der Bahnstromkreise

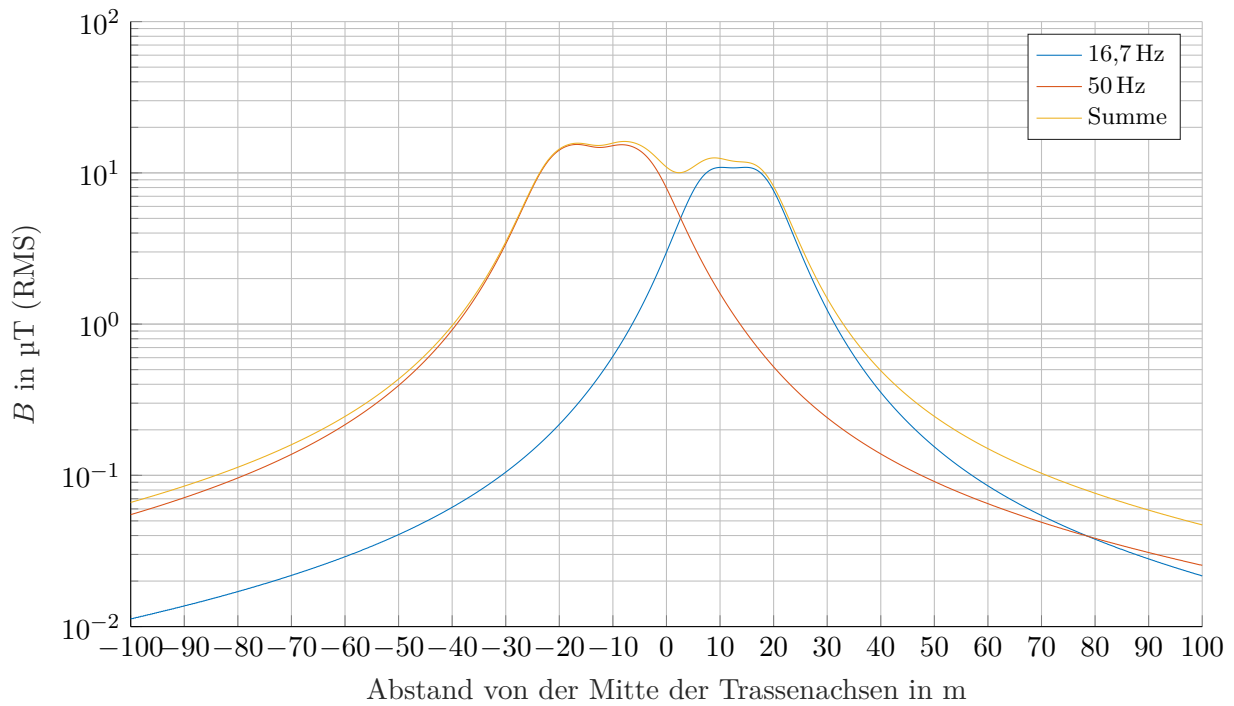


Abbildung 6.5: Frequenzabhängige Komponenten der mag. Flussdichte samt betragsmäßiger Addition bei 50-/16,7-Hz-Parallelführung

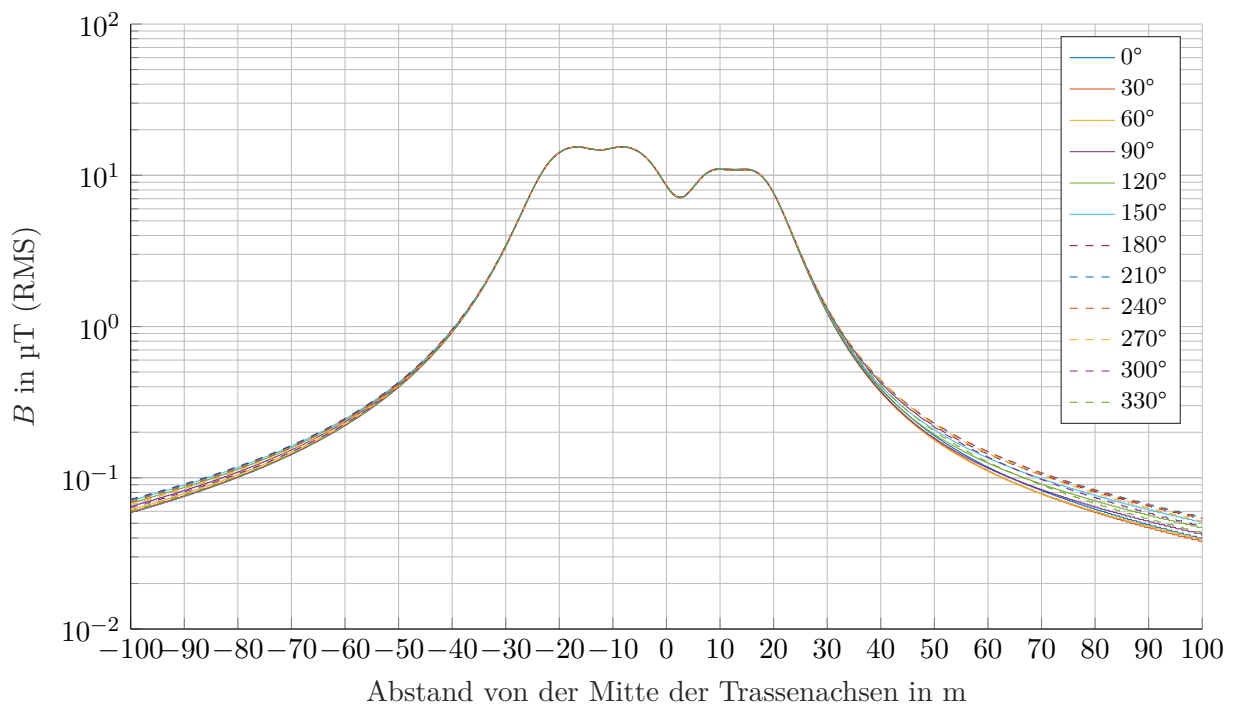


Abbildung 6.6: Vektorielle Summe der mag. Flussdichte bei 50-/16,7-Hz-Parallelführung in Abhängigkeit vom Phasenwinkel der Bahnstromkreise

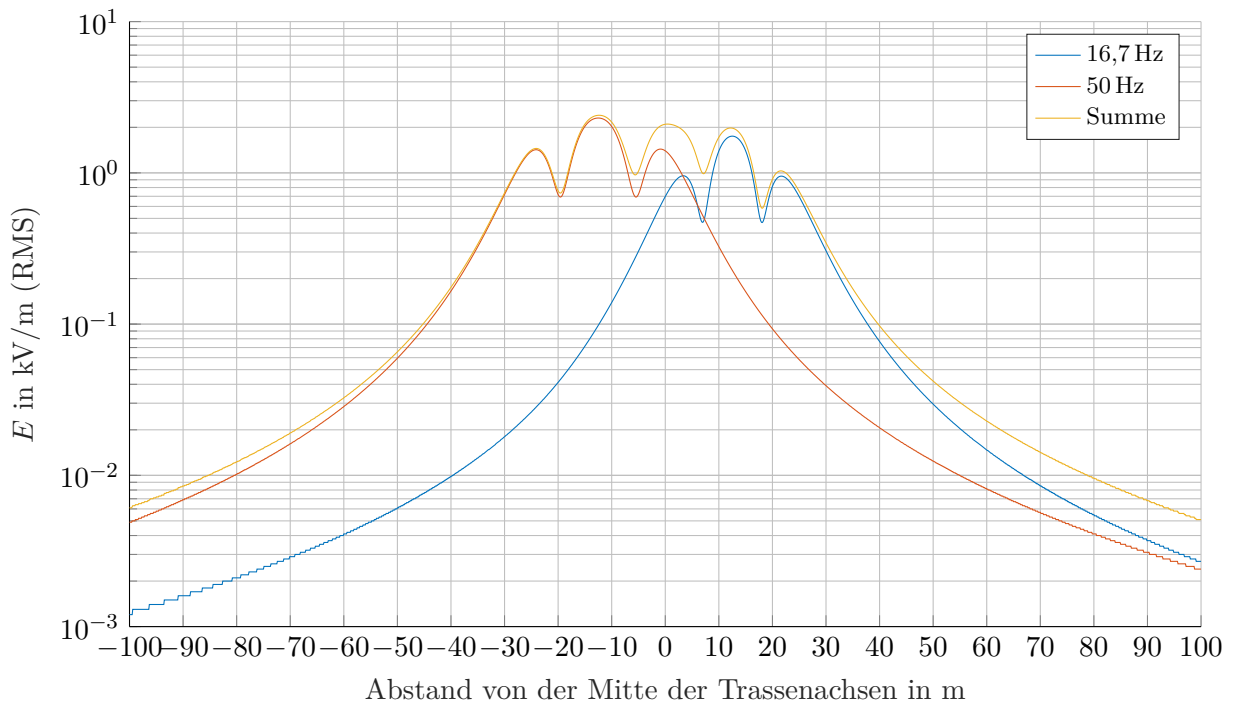


Abbildung 6.7: Frequenzabhängige Komponenten der el. Feldstärke samt betragsmäßiger Addition bei 50-/16,7-Hz-Parallelführung

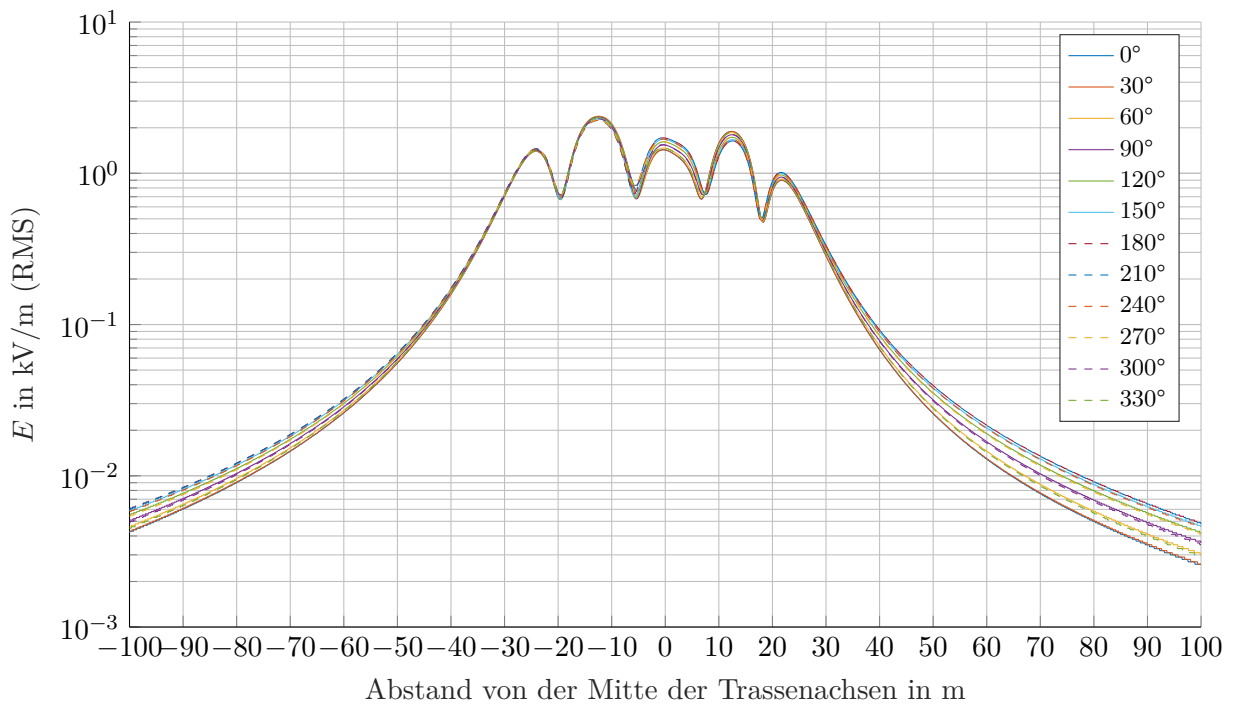


Abbildung 6.8: Vektorielle Summe der el. Feldstärke bei 50-/16,7-Hz-Parallelführung in Abhängigkeit vom Phasenwinkel der Bahnstromkreise

Ein Grund für die unterschiedlichen Maximalwerte der elektrischen Feldstärke bei der Parallelführung liegt in der oben erwähnten, geringeren Leiter-Erde-Spannung der Bahnstromleitung. Abgesehen davon ist sowohl in Bezug auf die elektrische Feldstärke als auch auf die magnetische Flussdichte bei den Bahnstromkreisen mit einer besseren Feldkompensation aufgrund der geringeren räumlichen Ausdehnung der Masttraverse zu rechnen. Dies liefert eine Erklärung für die unterschiedlichen Flussdichte-Spitzenwerte bei der Parallelführung und für den, verglichen mit den 50-Hz-Feldern, stärkeren Abfall der 16,7-Hz-Feldstärken und -Flussdichten mit zunehmendem Trassenabstand. Abseits dieser physikalischen Betrachtungen ist in der Praxis bei Anwendung von Gleichung 6.2 auf die betrachteten Anordnungen zu berücksichtigen, dass der Flussdichte-Grenzwert bei 16,7 Hz mit 300 μT im Vergleich zu den bei 50 Hz erlaubten 100 μT den dreifachen Wert aufweist.

Nun wird die Phasenlage der Bahnstromkreise sowohl beim Zweifrequenz-Viersystem-Masten als auch bei der Parallelführung verändert, während die Phasenlage der Drehstromkreise unverändert bleibt. Dazu wird zum Phasenwinkel der Bahnstromkreise jeweils 30° addiert und anschließend eine Berechnung der elektrischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte mit vektorieller Addition der Feldkomponenten ausgeführt. Dies wird solange fortgeführt, bis bei einer Phasenverschiebung von 360° der Ursprungszustand wieder erreicht ist. Dabei stellt die Phasenverschiebung von 180° einen besonderen Punkt dar, da diese Phasenverschiebung gleichbedeutend mit einem Neuanfang bei 0° Phasenverschiebung mit gleichzeitigem Tausch der Phasen R und T ist. Es zeigt sich, dass die gegenseitige Phasenlage der Stromkreise bei beiden betrachteten Geometrien so gut wie keinen Effekt auf die resultierende magnetische Flussdichte hat (Abbildungen 6.2 und 6.6). Allenfalls in großer Entfernung der Trassenachse sind geringfügige Abweichungen zu erkennen, wobei dies auch auf Ungenauigkeiten in der Berechnung zurückzuführen sein kann.

Bei der elektrischen Feldstärke der Zweifrequenz-Viersystem-Maste zeigt sich hingegen klar eine Abhängigkeit von der Phasenlage (Abbildung 6.4). Ein ähnlicher Effekt ist auch bei der elektrischen Feldstärke der Parallelführung zu beobachten (Abbildung 6.8), wobei hier die Feldstärke unter der Drehstromleitung annähernd konstant ist und eine Veränderung nur unter den Bahnstromkreisen sowie in großer Entfernung von der Mitte der Trassenachsen zu beobachten ist. Da bei der Überlagerung zweier Frequenzen die richtige Anwendung der gemeinsamen Periodendauer für die korrekte Berechnung der Effektivwerte von entscheidender Bedeutung ist, erscheint es nicht ausgeschlossen, dass dieses Ergebnis möglicherweise die Konsequenz eines Rechenfehlers infolge der Veränderung der Phasenlage der Bahnstromkreise ist. Um dies zu überprüfen, wurde dieselbe Berechnungsreihe nochmals durchgeführt, allerdings unter Veränderung der Phasenlage der Drehstromkreise, während die Phasenlage der Bahnstromkreise unverändert blieb. Dies führte zu einem unveränderten Ergebnis und lässt einen Rechenfehler als Ursache unwahrscheinlich erscheinen. Womöglich ist dieses Ergebnis auf eine mathematische Eigenheit der additiven Überlagerung zweier Sinusschwingungen mit unterschiedlicher Frequenz zurückzuführen. Die Tatsache, dass dieser Effekt nur bei der elektrischen Feldstärke und nicht bei der magnetischen Flussdichte auftritt, liegt möglicherweise darin begründet, dass bei ersterer zusätzlich der Spiegelladungseffekt des Erdbodens auftritt (siehe Abschnitt 2.1).

Vergleicht man die Ergebnisse der betragsmäßigen Addition der 16,7-Hz- und der 50-Hz-Flussdichten mit den physikalisch richtigen Ergebnissen, so fällt auf, dass die betragsmäßige Addition geringfügig höhere Ergebnisse liefert als die vektorielle Addition, wobei dieser Zusammenhang in

unmittelbarer Nähe zur Trassenachse ausgeprägter ist als in weiterer Entfernung von ihr. Derselbe Effekt zeigt sich auch bei der Betrachtung der elektrischen Feldstärken, wobei die betragsmäßige Summe hier höher liegt als die vektorielle Summe bei der ungünstigsten Phasenverschiebung.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass im Falle des Zusammenwirkens von 16,7- und 50-Hz-Feldern bei allen Phasenlagen die physikalisch korrekte Summation der Feldstärken bzw. Flussdichten zu geringfügig niedrigeren Effektivwerten führt als die betragsmäßige Addition der Effektivwerte der einzelnen Frequenzanteile. Aus Praktikabilitätsgründen und da die ICNIRP-Grenzwerte nur jeweils für einzelne Frequenzen definiert sind, erscheint die betragsmäßige Summation als sichere und einfach anwendbare Lösung, um die Grenzwerteinhaltung beim Zusammenwirken der Felder mehrerer Quellen sicherzustellen, ohne dabei unnötig große Sicherheitsabschläge vorzusehen.

6.2 Hochfrequenz-Überlagerung

Seit der Abschaltung der letzten öffentlich-rechtlichen Lang-, Mittel- und Kurzwellen-Hörfunksender im Jahr 2015 ist die Nutzung des Frequenzbereichs unter 10 MHz in Deutschland zurückgegangen. Zwar sind insbesondere im Kurzwellenbereich nach wie vor zahlreiche Amateurfunkstationen aktiv, doch benötigen diese in aller Regel keine Standortbescheinigung gemäß BEMFV, wie in deren § 4 Abs. 2 festgelegt wird. Dasselbe gilt für einen Senderstandort, an dem eine gesamte äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP) von weniger als 10 W genutzt wird (§ 4 Abs. 1 der BEMFV). Das Erfordernis einer solchen Standortbescheinigung bei der Hochfrequenzanlage ist aber gemäß 26. BImSchV Voraussetzung für die Notwendigkeit der Prüfung der Grenzwerteinhaltung bei Überlagerung der Felder einer Nieder- und einer Hochfrequenzanlage bis 10 MHz (siehe Kapitel 6). Wie in Abschnitt 2.7.3 erwähnt, ist diese Prüfung dann auszuführen, wenn sich ein Ort, der zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt ist, gleichzeitig innerhalb von weniger als 300 m Abstand zur Hochfrequenzanlage und innerhalb des in Abschnitt II.3.1 der LAI-Durchführungshinweise für den jeweiligen Anlagentyp festgelegten Abstands zur Niederfrequenzanlage befindet.

Wie in Abschnitt 2.1 dargestellt, sind im hochfrequenten Bereich die elektrische und die magnetische Feldkomponente unter bestimmten Umständen miteinander gekoppelt und können nicht unabhängig voneinander betrachtet werden. Dies trifft im sogenannten Fernfeld, das im Falle einer klassischen (Hertzschen) Dipol-Antenne ab einem Abstand von $\lambda/2\pi$ in Hauptstrahlrichtung zur Antenne dominiert, zu. Dort sind die elektrische und die magnetische Feldstärke über den Zusammenhang $E = Z \cdot H$ verbunden; Z errechnet sich dabei aus der Permittivität und der Permeabilität des jeweiligen Mediums gemäß $Z = \sqrt{\mu/\epsilon}$ ([2] S. 105 f.). Dieser sogenannte Feldwellenwiderstand beträgt im Vakuum und damit in sehr guter Näherung auch in Luft $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \approx 376,7 \Omega$. Sind das Richtdiagramm der Antenne und die verwendete Sendeleistung bekannt, können einfach die Leistungsdichte (Betrag des Realteils des Poynting-Vektors) und aus dieser über den Feldwellenwiderstand die elektrische und die magnetische Feldstärke in einem bestimmten Abstand von der Antenne berechnet werden, solange sich dieser Abstand im Fernfeld befindet. Allenfalls durch Fremdkörper wie Gebäude kann eine Abschirmung der Feldstärken erreicht werden, wobei dieser Effekt im in Frage stehenden Frequenzbereich nur gering ausgeprägt ist.



Abbildung 6.9: DCF77-Betriebsantenne [71]

In geringeren Abständen relativ zur Wellenlänge zur Antenne herrscht dagegen das sogenannte Nahfeld vor, in dem der Feldwellenwiderstand variiert und sich erst zur Grenze zum Fernfeld hin dem oben genannten Wert annähert. Dieser Verlauf des Feldwellenwiderstands ist vom jeweiligen Antennentyp abhängig und in aller Regel nicht analytisch zu berechnen. Folglich kann alleine aus der Kenntnis von Sendeleistung und Richtdiagramm nicht auf die elektrischen und magnetischen Feldstärken im Nahfeld geschlossen werden. Dies wiegt umso schwerer, als im in Frage stehenden Frequenzbereich unterhalb von 10 MHz die Wellenlänge 30 m und mehr beträgt, was bedeutet, dass der oben beschriebene Bereich zur Überprüfung der Grenzwerteinhaltung bei Feldüberlagerung von 300 m um den Sender herum zu großen Teilen oder in Gänze vom Nahfeld ausgefüllt werden kann. Die elektrischen und magnetischen Hochfrequenz-Feldstärken können dann nur noch messtechnisch oder mittels numerischer Nahfeldberechnung ermittelt werden.

6.2.1 Modellierung der Antenne

Im Rahmen dieses Abschnitts soll beispielhaft der Sender DCF77 in Mainhausen nahe Aschaffenburg betrachtet werden. Dieser arbeitet mit einer Frequenz von 77,5 kHz, was einer Wellenlänge von 3,87 km entspricht, und sendet Zeitzeichen, die zur Synchronisation von Funkuhren genutzt werden. Es wird ein Vertikalstrahler mit einer von zwei Stahlfachwerkmasten gehaltenen Dachkapazität verwendet (siehe Abbildung 6.9). Da es nicht möglich war, vom Betreiber des Senders genauere Angaben zur Antennenanlage zu erhalten, muss auf öffentlich zugängliche Informationen zurückgegriffen werden:

- das umfangreiche Erdnetz liegt in 25 cm Tiefe und die Bodenleitfähigkeit ist aufgrund des hohen Grundwasserspiegels hoch ([71] S. 221),
- die Betriebsantenne ist 150 m hoch und die Sendeleistung beträgt 50 kW ([71] S. 228),
- die Antenne hat Rundstrahlcharakteristik, wobei die Abweichung zum idealen Rundstrahler in keiner Richtung 2 dB übersteigt ([71] S. 228),
- die tatsächlich abgestrahlte Leistung beträgt 30 bis 35 kW ([71] S. 228),
- die Stahlfachwerkmasten tragen nicht zur Abstrahlung bei ([72] S. 242) und
- die Dachkapazität besteht aus sechs parallel hängenden Leiterseilen (siehe Abbildung 6.9).

Dachkapazität und Erdnetz sind zur Steigerung des Antennenwirkungsgrades notwendig, da der Vertikalstrahler mit seiner Höhe von 150 m deutlich kleiner ist als die abgestrahlte Wellenlänge. Anhand von Abbildung 6.9 war es möglich, die Antennenanlage im Satellitenbild ausfindig zu machen und den horizontalen Abstand der Stahlfachwerkmasten zu 250 m zu bestimmen.

WinField kann zwar auch für Feldberechnungen im Hochfrequenzbereich verwendet werden, allerdings ausschließlich im Fernfeld¹⁰⁰. Für (Nah-)Feldberechnungen an derartigen Drahtantennen besonders geeignet ist das am Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien, USA, entwickelte Programm NEC (Numerical Electromagnetics Code) ([73] S. 242). Dieses arbeitet nach der Momentenmethode (auch als Randelementmethode bekannt), um für eine gegebene Antennen-geometrie mit gegebener Sendeleistung ausgehend von den Maxwell-Gleichungen die elektrischen und magnetischen Feldstärken im Raum zu errechnen. Für eine genauere Beschreibung des mathematischen Verfahrens sei auf die entsprechende Dokumentation verwiesen [74]. Erst ab Programmversion 3 ist NEC in der Lage, den Einfluss von Erdnetzen korrekt zu berechnen ([74] S. 3). Ab Programmversion 4.2 ist eine Option zur besonders genauen Berücksichtigung des Erdeinflusses auf das Strahlungsverhalten der Antenne verfügbar, die auf Sommerfeld-Integralen beruht [75]. Diese neue Option („GN3“) hat ferner den Vorteil, dass die magnetischen Feldstärken im Nahfeld mit derselben Genauigkeit wie die elektrischen Feldstärken berechnet werden, was beim Bodenmodell früherer Programmversionen nicht der Fall war ([76] S. 15). Im Rahmen dieses Abschnitts soll daher NEC 4.2 verwendet werden.

Ähnlich wie WinField arbeitet auch NEC mit einer Zerlegung der Antennengeometrie in einzelne Leitersegmente. Im Interesse einer größtmöglichen Simulationsgenauigkeit sind dabei folgende Randbedingungen zu beachten ([76] Kapitel 2):

- Die Segmentlänge Δ sollte im Allgemeinen weniger als 10% und kritischen Regionen weniger als 5% der Wellenlänge betragen. Anders als bei den früheren Versionen können ab Version 4 von NEC auch sehr kurze Segmente korrekt berechnet werden.
- Das Verhältnis $2\pi r/\lambda$ soll deutlich kleiner als eins sein, wobei r den Radius eines Segments bezeichnet. Das Verhältnis von Segmentlänge zu Radius Δ/r soll sich im hohen einstelligen Bereich bewegen.
- Um elektrisch verbunden zu sein, müssen sich die Endpunkte zweier Segmente berühren.

¹⁰⁰Herstellerinformation vom 20. April 2018.

- Segmente dürfen sich nicht überlappen; die Mittelpunkte mehrerer Segmente sollten weiter als den dreifachen Segmentdurchmesser voneinander entfernt sein.
- Die an das Einspeisungssegment anschließenden Segmente sollten möglichst die gleiche Länge haben; bei mehreren anschließenden Segmenten sollte deren jeweilige Länge der des Speisesegments entsprechen.
- Einzelne Segmente müssen sich vollständig oberhalb bzw. unterhalb des Erdbodens befinden.

Unter Berücksichtigung dieser Vorgaben soll ein Modell der Antenne in NEC 4.2 erstellt werden. Besonderer Bedeutung kommt dabei den anzusetzenden Parametern des Erdbodens zu. In Anlehnung an die in Abschnitt 3.1.3.2 gemachten Feststellungen soll der Erdboden einen spezifischen Widerstand von $50\,\Omega\text{m}$ aufweisen. Dies entspricht der unteren Grenze für Lehm-, Ton- und Humusböden und scheint aufgrund der oben erwähnten hohen Bodenleitfähigkeit angemessen. Ferner ist die relative Permittivität des Bodens von Bedeutung. Für Lehmboden mit einem volumetrischen Wassergehalt von 16,5% wurde bei ca. 100 kHz für ϵ_r ein Wert von etwa 100 ermittelt [77], der im Folgenden verwendet werden soll.

Listing 6.1: NEC-4.2-Modell der DCF77-Sendeantenne

```

1 CM DCF77-Sendeantenne Mainhausen
2 GW 1 14 125 0 -0.25 4 0 -0.25 .01
3 GW 1 1 4 0 -0.25 0 0 0 .01
4 GR 0 12
5 GW 2 100 0 0 0 0 0 125 .05
6 GW 3 10 0 -5 125 0 5 125 .05
7 CW 10 100 -125 -5 150 0 -5 125 .0125 3 128.5425
8 CW 10 100 0 -5 125 125 -5 150 .0125 3 128.5425
9 GM 0 5 0 0 0 0 2 0 10 1 0 0
10 GE
11 FR 0 1 0 0 0 0.0775 0
12 GN 3 0 0 0 100 0.02
13 LD 5 1 0 1000 5.8E7
14 LD 5 2 0 10000 3.8E7
15 LD 5 3 0 10000 3.8E7
16 LD 5 10 0 10000 3.8E7
17 EX 0 2 1 0 1

```

Das verwendete Modell ist in Listing 6.1 dargestellt. In den Zeilen 2 bis 4 wird zunächst das Erdnetz aus zwölf sternförmig verlegten Erdleitern erstellt. Neben der oben festgestellten Verlegetiefe von 25 cm werden ein Radius der Erdleiter von 10 mm und eine Länge von 125 m angenommen. In Zeile 5 wird auf das Erdnetz ein 125 m hohes Leiterstück aufgesetzt. Wie in Abbildung 6.9 zu sehen, ist der Vertikalstrahler als Bündelleiter ausgeführt. Um das Modell nicht unnötig kompliziert zu machen, wird dieser als Massivleiter mit 50 mm Radius modelliert. Auf den Vertikalstrahler wird in Zeile 6 ein 10 m langes Verbindungsstück derselben Dicke aufgesetzt, das in Richtung der y-Achse orientiert ist und zur Verbindung der Leiterseile der Dachkapazität dienen soll. Die Dachkapazität soll, um den Durchhang der Leiterseile korrekt zu modellieren, als Kettenlinie ausgeführt werden. Aus Gründen der Segmentierung und des Anschlusses an den Vertikalstrahler wird die Kettenlinie in Form zweier Teilstücke modelliert. In einem vorhergehenden Berechnungsdurchlauf wurde die Bogenlänge der Kettenlinie bei einem angenommenen Durchhang von 25 m und einem horizontalen

Abstand der Aufhängungen von 250 m zu 257,085 m bestimmt; die beiden Teilstücke der Kettenlinie müssen folglich genau die halbe Länge aufweisen, um den Durchhang korrekt abzubilden. Durch den angenommenen Durchhang befinden sich die Aufhängungen auf genau 150 m Höhe, was im Einklang mit den oben ermittelten Informationen steht. In Anlehnung an den Freileitungsbau wird ein Leiterseilradius von jeweils 12,5 mm angenommen. In Zeilen 7 und 8 wird zunächst ein Leiterseil der Dachkapazität modelliert, das anschließend in Zeile 9 fünffach im Abstand von jeweils zwei Metern vervielfältigt wird, um insgesamt sechs Leiterseile zu erhalten. Die Antennengeometrie ist damit abgeschlossen.

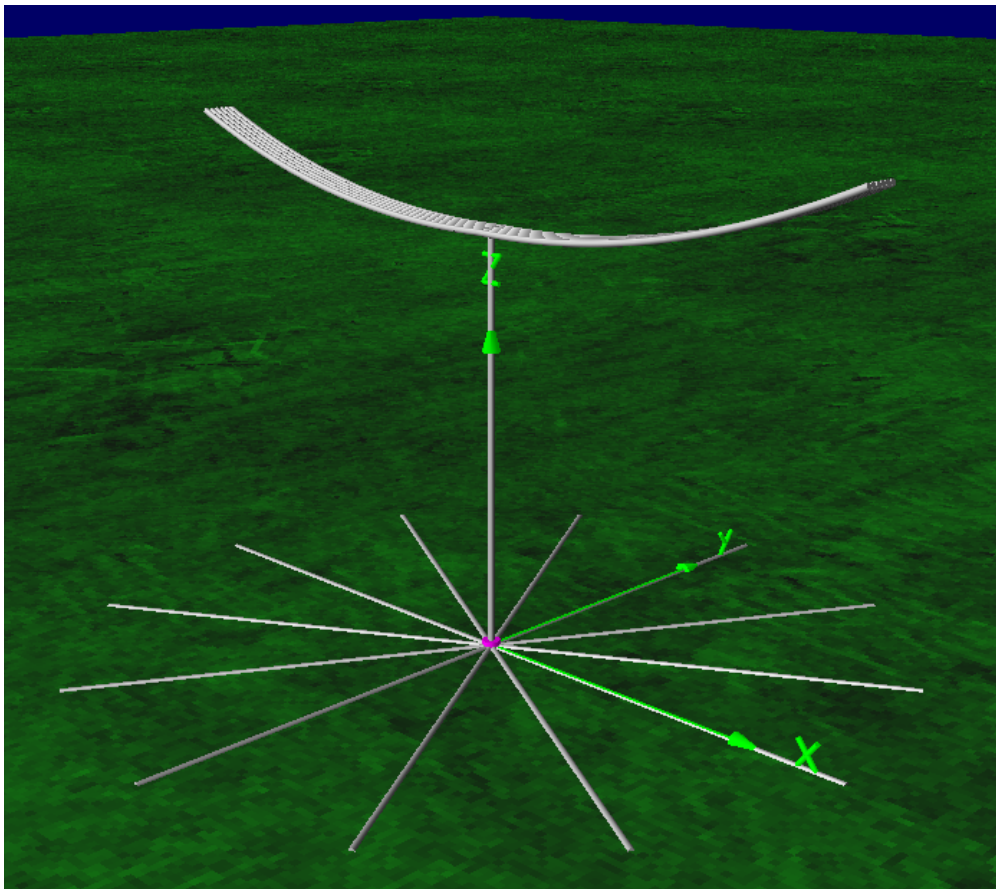


Abbildung 6.10: NEC-4.2-Geometrie der DCF77-Sendeantenne (siehe Listing 6.1)

In Zeile 11 wird die Frequenz fest auf 77,5 kHz festgelegt. In Zeile 12 wird die oben erwähnte, besonders genaue Berücksichtigung des Erdeinflusses aktiviert; für den Erdboden werden die oben ermittelten Parameter angenommen, wobei anstatt des spezifischen Widerstands der Leitwert angegeben wird. In den Zeilen 13 bis 16 wird festgelegt, dass das Erdnetz aus Kupfer ($\sigma = 5,8 \cdot 10^7 \text{ 1}/\Omega \text{ m}$) und die oberirdischen Teile der Antenne aus Aluminium ($\sigma = 3,8 \cdot 10^7 \text{ 1}/\Omega \text{ m}$) bestehen sollen. Zeile 17 schließlich gibt an, dass die Einspeisung der Antenne am unteren Ende des Vertikalstrahlers mit einer Spannung von 1 V erfolgen soll. Die genaue Höhe der Spannung ist allerdings unerheblich, da die Rechenergebnisse von der verwendeten Oberfläche 4NEC2 auf die vorgegebene Sendeleistung skaliert werden. Da 4NEC2 auch die Berechnungsbefehle selbst einfügt, fehlen diese in Listing

6.1. In Abbildung 6.10 ist die von 4NEC2 erstellte Visualisierung dieser Geometrie mitsamt des Koordinatensystems dargestellt.

6.2.2 Ergebnisse

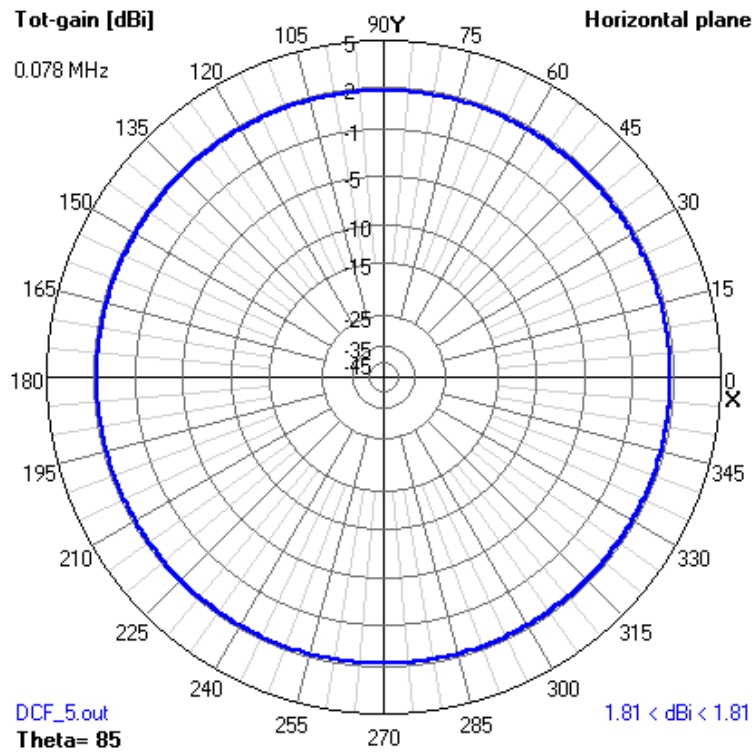


Abbildung 6.11: Horizontales Richtdiagramm der DCF77-Sendeantenne

Zunächst werden zur Überprüfung des Modells die Fernfeld-Richtdiagramme mit einer Winkelauflösung von 1° berechnet (Abbildungen 6.11 und 6.12). Als Grundlage dient der isotrope Kugelstrahler (dBi). In der Horizontalen ist das Richtdiagramm für einen Elevationswinkel von 5° dargestellt, wobei sich fast eine perfekte Rundstrahlcharakteristik zeigt. Dies steht im Einklang mit den oben ermittelten Informationen. In der Vertikalen ist das bekannte Richtdiagramm einer Monopol-Antenne zu erkennen, wobei der Erdeinfluss bei niedrigsten Elevationswinkeln ein Absinken des Gewinns bewirkt. Die errechnete Strahlungseffizienz liegt bei 56,95%, was bei 50 kW Eingangsleistung eine abgestrahlte Leistung von 28,5 kW bedeutet. Dies liegt nur knapp unterhalb des veröffentlichten Wertebereichs von 30 bis 35 kW. Die Modellierung wird damit als bestätigt angesehen.

Eine mehr theoretische Überlegung besteht in einem Vergleich des Modells mit dem (idealen) Hertzschen Dipol. Dieser ist, wie die betrachtete Antenne, deutlich kürzer als die Wellenlänge und weist eine homogene Stromverteilung auf. Die letztere Eigenschaft kann aufgrund der Dachkapazität auch für den Vertikalstrahler im betrachteten Modell angenommen werden. Der Hertzsche Dipol verfügt im Freiraum über einen Gewinn von 1,76 dBi. Wird der Erdboden als ideal leitende Fläche angenommen, so beschränkt sich die Abstrahlung auf den oberen Halbraum und der Gewinn steigt

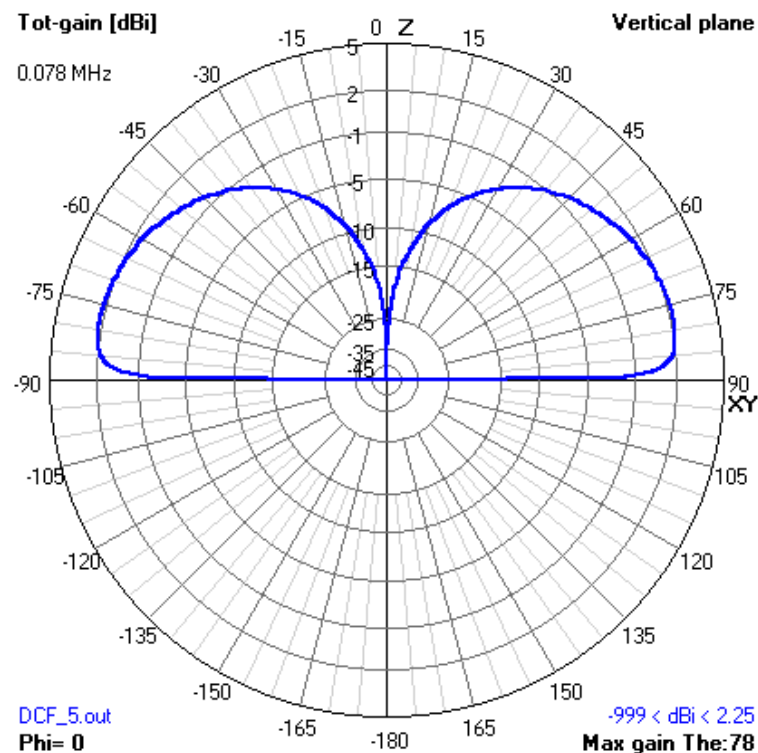


Abbildung 6.12: Vertikales Richtdiagramm der DCF77-Sendeantenne

um 3 dB auf 4,76 dBi. Die oben errechnete Strahlungseffizienz von 56,95% bringt eine Verringerung des Gewinns um 2,45 dB auf schließlich 2,31 dBi mit sich. Dies entspricht fast genau dem numerisch ermittelten maximalen Gewinn von 2,25 dBi (rechts unten in Abbildung 6.12). Auch dies spricht für die Richtigkeit des Modells.

Von 3 kHz bis 10 MHz gelten gemäß Anhang 1a der 26. BImSchV Grenzwerte von 83 V/m (effektiv) für die elektrische Feldstärke und von 27 μ T (effektiv) für die magnetische Flussdichte, wobei letzterer Wert für $\mu_r = 1$, was bei Luft in sehr guter Näherung der Fall ist, einer magnetischen Feldstärke von 21,5 A/m entspricht. Die Angabe der magnetischen Feldstärke ist im Hochfrequenzbereich gebräuchlicher als die der Flussdichte und soll innerhalb dieses Abschnitts verwendet werden. Folglich gelten im gesamten Frequenzbereich, der der Überlagerungsbetrachtung mit einer Niederfrequenzanlage unterfallen kann, dieselben Grenzwerte.

In Abbildung 6.13 ist das errechnete elektrische Nahfeld der DCF77-Sendeantenne im 10-m-Raster, bezogen auf den Grenzwert von 83 V/m und vor dem Hintergrund der Antennenstruktur, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Grenzwert in etwa 125 m Entfernung vom Koordinatenursprung auf der y-Achse und in etwa 175 m Entfernung vom Koordinatenursprung auf der x-Achse erstmals unterschritten wird. Nimmt man an, dass die Abspannungen der Stahlfachwerkmasten (siehe Abbildung 6.9) einen Winkel von 45° gegenüber der Erdoberfläche aufweisen, bedeutet dies, dass bei einer Masthöhe von 150 m der Grenzwert noch innerhalb des Bereiches der Abspannseile unterschritten wird. Der Blick auf das Satellitenbild legt nahe, dass im Fall der DCF77-Sendeantenne der Abstand bis zum nächsten Ort für den nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Personen mehr als 400 m vom Koordinatenursprung beträgt. In dieser Entfernung auf der x-Achse liegt noch eine Feldstärke

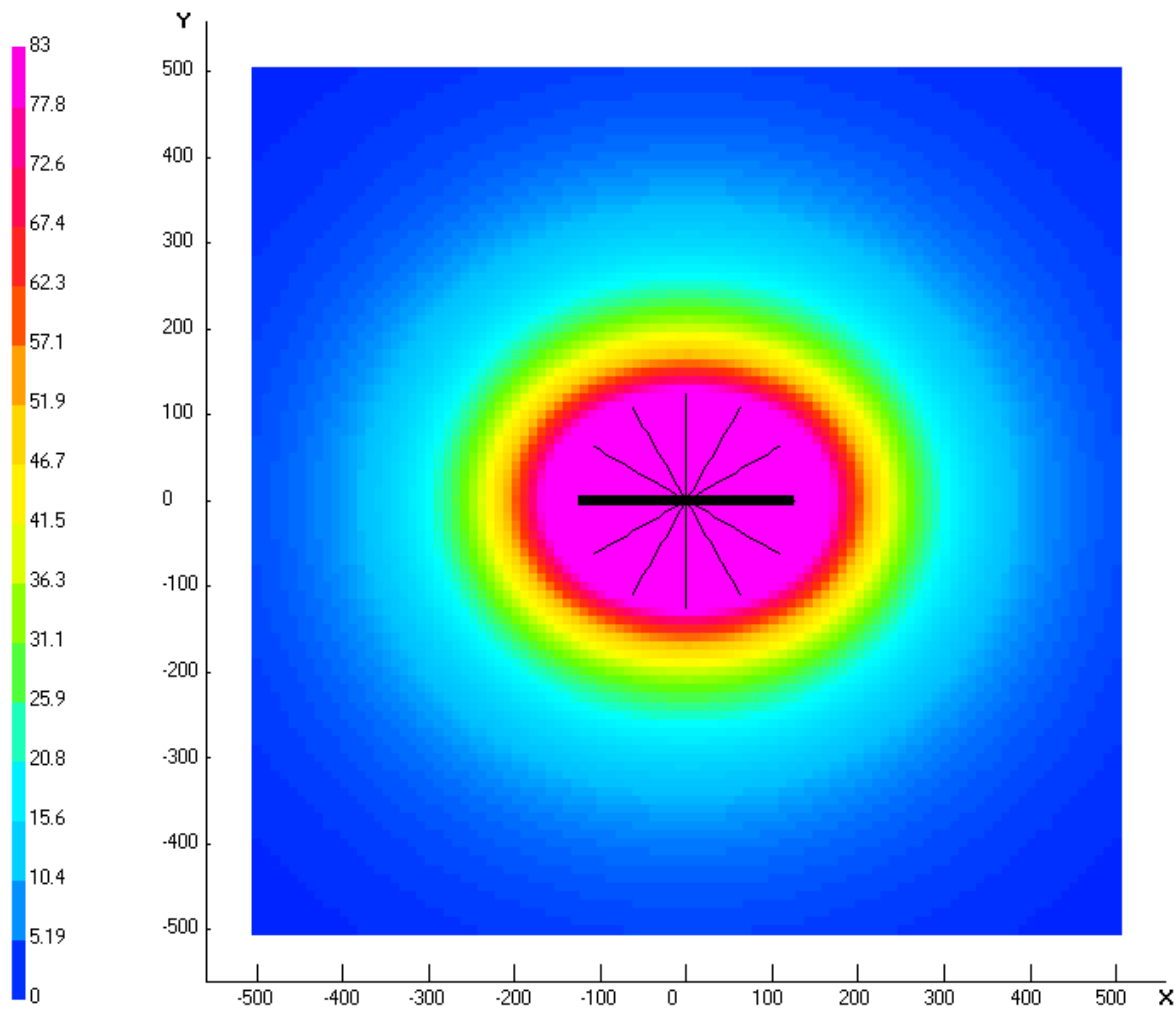


Abbildung 6.13: Elektr. Nahfeld der DCF77-Sendeantenne in V/m in 1 m Höhe (x und y in m)

von $9,0 \text{ V/m}$ vor (siehe Tabelle 6.2), was einer Grenzwertausschöpfung von $10,8\%$ entspricht. Da die Stahlfachwerkmasten der DCF77-Sendeantenne jeweils 125 m vom Ursprung entfernt auf der x -Achse liegen, befindet sich dieser Ort noch innerhalb der 300-m -Entfernung von der Sendeanlage, sodass gegebenenfalls eine Überlagerungsbetrachtung der Grenzwertausschöpfung erforderlich ist. Der verfügbare Grenzwert für eine dort zu errichtende 50-Hz -Anlage verringert sich entsprechend auf $89,2\%$ bzw. auf $4,46 \text{ kV/m}$.

An dieser Stelle soll ein Vergleich der errechneten Feldstärkewerte mit Messwerten aus der Literatur erfolgen. Im Jahr 1995 wurden Feldstärkemessungen in der Umgebung der Marinefunk-Sendestelle Neuuharlingersiel durchgeführt. Dort befand sich eine Langwellenantenne, die an drei 160 m hohen Masten aufgehängt war. Die Sendeleistung betrug 30 kW und die Sendefrequenz 52 kHz . In einem Abstand von 140 m wurden in Hauptsenderichtung eine elektrische Feldstärke von 80 V/m und in entgegengesetzter Richtung eine Feldstärke von 20 V/m gemessen; die Messwerte in den seitlichen Bereichen lagen zwischen den angegebenen Werten. In einer Entfernung von 360 m entgegen der Hauptsenderichtung lag die elektrische Feldstärke noch bei 10 V/m [78].

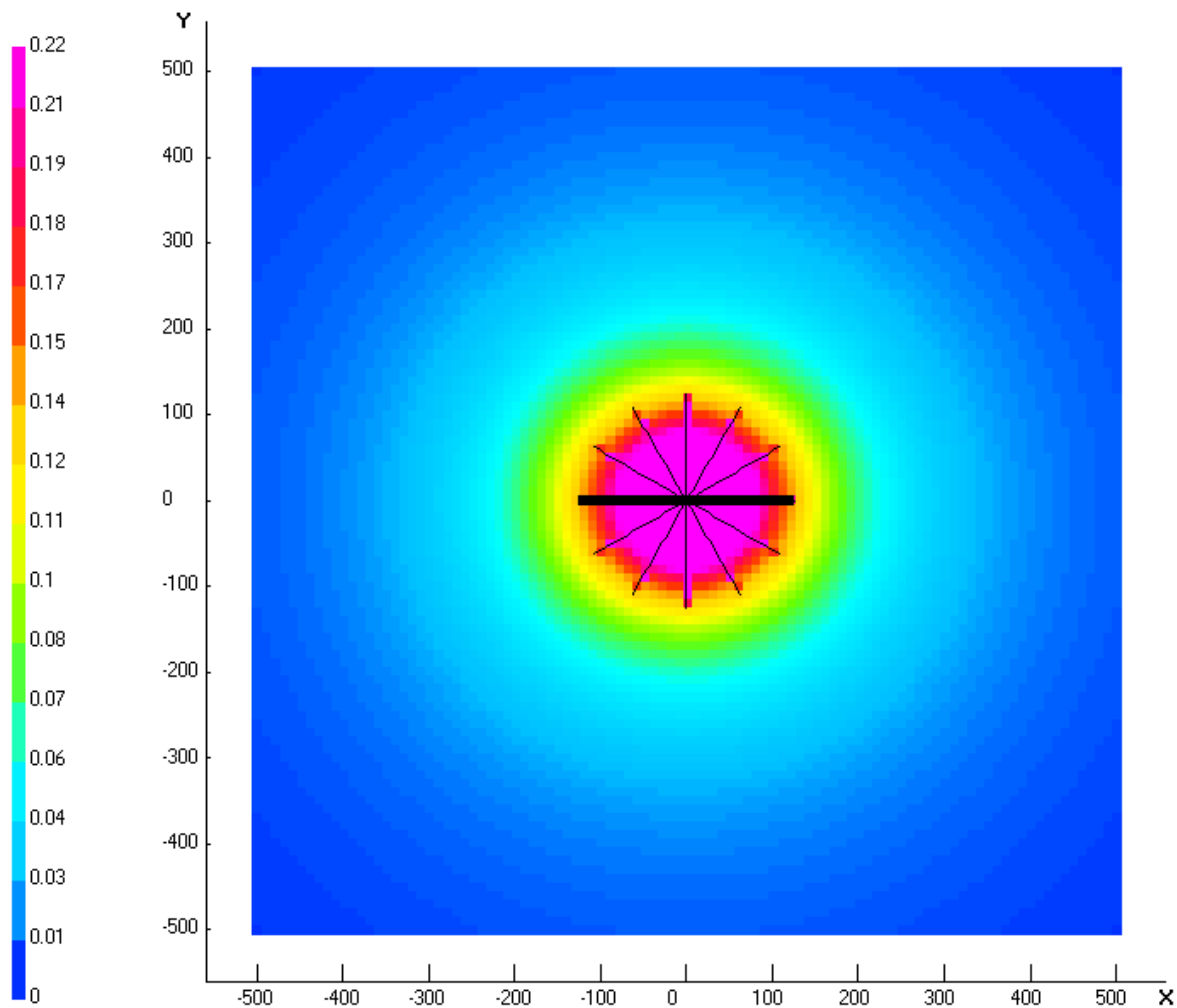


Abbildung 6.14: Magnet. Nahfeld der DCF77-Sendeantenne in A/m in 1 m Höhe (x und y in m)

Während die Sendeleistung in diesem Fall etwas niedriger als bei DCF77 liegt, ist die Antenne aufwendiger ausgeführt, sodass zu vermuten ist, dass die geringere Sendeleistung durch einen höheren Antennenwirkungsgrad zumindest teilweise kompensiert wird. Die Frequenz liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie bei DCF77, weswegen insgesamt von vergleichbaren Bedingungen ausgegangen wird. Im Fall der DCF77-Antenne, deren Stahlfachwerkmasten sich auf der x -Achse in jeweils 125 m Entfernung vom Koordinatenursprung befinden, bedeuten 140 m Abstand von der Antenne eine x -Koordinate von 265 m. Wie in Abbildung 6.13 zu erkennen, beträgt die errechnete elektrische Feldstärke an diesem Punkt zwischen 31 und 36 V/m. In y -Richtung dagegen bedeuten 140 m Abstand von der Antenne auch annähernd denselben Abstand vom Ursprung, wobei dort eine errechnete Feldstärke zwischen 62 und 67 V/m vorliegt. Wendet man dieselben Betrachtungen auf einen Abstand von der Antenne von 360 m an, so liegen die errechneten Feldstärkewerte zwischen 5 und 15 V/m. Die errechneten Feldstärkewerte liegen damit im selben Bereich wie die bei obiger Messung ermittelten, was für die Richtigkeit der Modellierung spricht.

In Abbildung 6.14 ist das errechnete magnetische Nahfeld im 10-m-Raster dargestellt. Da die ermittelten Feldstärken weit unterhalb des oben angegebenen Grenzwertes von 21,5 A/m liegen, wurde

als Maßstab nicht dieser, sondern ein Wert von $0,22 \text{ A/m}$ gewählt. Dieser Wert ergibt sich aus der Division des Grenzwertes der elektrischen Feldstärke von 83 V/m durch den oben angegebenen Freiraum-Feldwellenwiderstand Z_0 ; es handelt sich also um diejenige magnetische Feldstärke, die ein elektrisches Feld in Höhe des Grenzwertes unter Fernfeldbedingungen hervorrufen würde. Dieser Wert ist bereits in etwa 100 m Entfernung vom Koordinatenursprung unterschritten, was bedeutet, dass im Falle der DCF77-Sendeantenne die elektrische Feldstärke im Nahfeld überwiegt. Dies entspricht den üblichen Verhältnissen im Nahfeld einer sogenannten elektrischen Antenne, bei der die Abstrahlung in erster Linie durch die erzeugte Spannungsdifferenz innerhalb der Antennenstruktur erfolgt. Dies bedeutet, dass die magnetische Feldstärke bzw. Flussdichte der DCF77-Sendeantenne nur eine vernachlässigbar kleine Ausschöpfung des Grenzwertes bewirkt und deshalb bei der Errichtung von Niederfrequenzanlagen in ihrer Umgebung in der Praxis außer Acht bleiben kann.

Im Gegensatz zu den elektrischen Antennen geschieht die Abstrahlung bei den sogenannten magnetischen Antennen nicht durch eine Spannungsdifferenz, sondern durch einen fließenden Strom. Dies bedeutet, dass bei magnetischen Antennen im Nahfeld die magnetische Feldkomponente überwiegt und sich die elektrische erst bis zum Übergang zum Fernfeld hin entwickelt. Es ist leicht vorstellbar, dass für die Abstrahlung größerer Leistungen mittels magnetischer Antennen eine sehr hohe Stromstärke notwendig ist, die entsprechende ohmsche Verluste in der Antennenstruktur zur Folge hat. Aus diesem Grund werden im in Frage stehenden Frequenzbereich bei kommerziellen Sendeanlagen in aller Regel elektrische Antennen verwendet.

Dies bedeutet, dass die oben gemachten Feststellungen zur HF-Überlagerung verallgemeinert werden können: der nächstgelegene Ort für den nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Personen in der Umgebung einer Sendeanlage kann sich erst dort befinden, wo die elektrische Feldstärke der Sendeanlage unterhalb des Grenzwertes von 83 V/m liegt. Befindet sich dieser Ort im Fernfeld der Sendeanlage, so beträgt die magnetische Feldstärke dort höchstens $0,22 \text{ A/m}$ und damit maximal 1% des Grenzwertes. Befindet sich der Ort im Nahfeld, ist die magnetische Flussdichte, wie oben beschrieben, sogar noch geringer. Für einen Verteilnetzbetreiber, in dessen Netzgebiet sich eine ortsfeste Sendeanlage im Frequenzbereich bis 10 MHz mit der Erfordernis einer Standortbescheinigung befindet, sind dies vorteilhafte Bedingungen: Mittelspannungskabel und Ortsnetzstationen sind die zahlenmäßig weit überwiegenden Betriebsmittel im Verteilnetz; gleichzeitig ist ihr Standort durch die vorliegende Siedlungs- und Verbrauchsstruktur festgelegt und nur innerhalb enger Grenzen veränderlich. Nachdem aber weder bei Kabeln noch bei Ortsnetzstationen ein elektrisches Feld nach außen dringen kann, ist der Netzbetreiber frei, solche Betriebsmittel auch in der Nähe der Sendeanlage zu platzieren, ohne eine Grenzwertüberschreitung bei der magnetischen Flussdichte durch den Beitrag der Sendeanlage befürchten zu müssen. Lediglich im Falle von 110-kV -Freileitungen und von Freiluft-Umspannwerken muss auch die (teilweise erhebliche) Grenzwertausschöpfung der Sendeanlage bei der elektrischen Feldstärke berücksichtigt werden, doch einerseits kommen diese Anlagen im Verteilnetz deutlich seltener vor und zum anderen kann ihr Standort einfacher verändert werden, wenn am ursprünglich geplanten Aufstellungsort eine Grenzwertüberschreitung zu befürchten wäre.

In Tabelle 6.2 sind die errechneten Werte der elektrischen Feldstärke tabellarisch als Querschnitt für $y = 0$ dargestellt. Aufgrund der Symmetrie des Modells gelten die angegebenen Feldstärkewerte ebenso für die entsprechenden negativen Werte von x . Wie in Abbildung 6.13 zu erkennen, stellt der

Tabelle 6.2: Elektrische Feldstärke an der DCF77-Sendeantenne in 1 m Höhe für $y = 0$

Koordinate x [m]	E [V/m]	Ausschöpfungsgrad [%]
50	253,4	305,3
100	155,6	187,5
150	99,6	120,0
200	59,7	71,9
250	35,1	42,3
300	21,3	25,7
350	13,5	16,3
400	9,0	10,8
450	6,3	7,6
500	4,7	5,7

Querschnitt durch $y = 0$ im Hinblick auf die elektrische Feldstärke die ungünstigsten Umstände dar. Der Ausschöpfungsgrad bezieht sich auf die nach 26. BImSchV zulässige Feldstärke von 83 V/m.

Aus den Abbildungen in Abschnitt 3.1.1 ergibt sich, dass die elektrische Feldstärke einer 110-kV-Freileitung (mit einfachen Leiterseilen) in einer Höhe von 1 m über dem Erdboden stets unter 3 kV/m bleibt. Dieselbe Höhe über dem Erdboden gilt gemäß Abschnitt III.2.4 der LAI-Hinweise auch für die Prüfung der Grenzwerteinhaltung. Die Freileitung bringt damit eine Grenzwertausschöpfung der elektrischen Feldstärke von höchstens 60% mit sich. Aus Tabelle 6.2 ist zu erkennen, dass der Ausschöpfungsgrad der DCF77-Sendeantenne bei $x = 250$ m 42,3% beträgt. Etwa ab diesem Abstand vom Koordinatenursprung könnte folglich eine 110-kV-Freileitung mit einfachen Leiterseilen ohne Einschränkungen platziert werden. Bei Freileitungen mit Bündelleitern, die in der Hochspannungsebene den Ausnahmefall darstellen, können geringfügig höhere elektrische Feldstärken in 1 m Höhe über dem Boden auftreten, sodass ein entsprechend größerer Abstand zur Sendeantenne einzuhalten wäre.

In Abbildung 3.136 ist zu erkennen, dass beim betrachteten Umspannwerksmodell die 0,5-kV/m-Linie so gut wie überall innerhalb des Umspannwerksgeländes bleibt. Dies bedeutet, dass die Grenzwertausschöpfung der elektrischen Feldstärke außerhalb des Zauns höchstens 10% beträgt. Für den Immissionsbeitrag der DCF77-Sendeantenne verbleiben damit noch 90% des Grenzwerts oder 74,7 V/m. Nimmt man wieder einen Winkel der Abspannseile von 45° gegenüber der Erdoberfläche bei einer Masthöhe von 150 m an, so ergibt sich aus Abbildung 6.13, dass dieser Wert noch innerhalb des Bereiches der Abspannseile unterschritten wird und damit an einem Ort, der für ein Umspannwerk aus praktischen Gründen nicht in Frage kommt.

Es kann damit festgestellt werden, dass in der Umgebung des im Rahmen dieses Abschnitts betrachteten DCF77-Senders unter dem Gesichtspunkt der Grenzwertausschöpfung keine Einschränkungen für die Platzierung eines Freiluft-Umspannwerks und nur geringe Einschränkungen für die Platzierung einer 110-kV-Freileitung bestehen. Erdkabel, Ortsnetzstationen und Innenraum-Umspannwerke können aufgrund der oben angestellten, grundsätzlichen Überlegungen ohne Einschränkungen errichtet werden.

7 Fazit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass die von der 26. BImSchVVwV vorgesehenen Minimierungsmaßnahmen in weiten Teilen grundsätzlich wirksam sind, ihrer Verwirklichung aber oftmals praktische Gründe oder andere Schutzgüter entgegenstehen. Bei wenigen Minimierungsmaßnahmen wurde entgegen den Angaben der 26. BImSchVVwV eine Wirkungslosigkeit oder sogar eine unter Umständen felderhöhende Wirkung festgestellt. Im Einzelnen sind dies die Erhöhung des Mastes bei Maststationen (siehe Abschnitt 3.3) sowie teilweise die Maßnahmen der Verringerung des System-Achsabstandes von Erdkabeln (siehe Abschnitt 3.2.3) und der Mitteneinspeisung auf der Niederspannungs-Sammelschiene der Fertigstation Typ 4227 (siehe Abschnitt 3.3.2). Zusätzlich wurden mehrere Minimierungsmaßnahmen betrachtet, die nicht in der 26. BImSchVVwV enthalten sind. Dabei zeigte sich, dass diese Minimierungsmaßnahmen zwar eine Feldverringerung herbeiführen können, jedoch aus technischen Gründen oder aus Gründen der Unverhältnismäßigkeit zwischen Aufwand und Nutzen ausscheiden.

Da der technische Fortschritt im hier in Frage stehenden Bereich der klassischen, nicht-leistungselektronischen Energieübertragungstechnik sehr langsam voranschreitet, gelten diese Schlussfolgerungen unverändert seit Erlass der 26. BImSchVVwV.

Gleichwohl führen die oben erkannten Defizite der 26. BImSchVVwV nicht zu ihrer juristischen Angreifbarkeit. Vielmehr wurde in Kapitel 5 die Sichtweise herausgearbeitet, dass die 26. BImSchVVwV als sogenannte normkonkretisierende Verwaltungsvorschrift nur einer eingeschränkten gerichtlichen Kontrolle unterliegt und die von ihr als wirksam postulierten Minimierungsmaßnahmen daher auch in einem etwaigen Gerichtsverfahren als solche anzusehen wären. Des Weiteren wurde erkannt, dass es deswegen und aufgrund des von der 26. BImSchVVwV eingeräumten Ermessensspielraums einem betroffenen Netzbetreiber oder einem beteiligten immissionsschutzrechtlichen Nachbarn nur in Ausnahmefällen möglich sein wird, eine gegebenenfalls von einer Behörde getroffene Auswahl durchzuführender Minimierungsmaßnahmen rechtlich anzugreifen bzw. zusätzlich durchzuführende Maßnahmen durchzusetzen.

Schließlich wurden ausgewählte Betrachtungen zur Feldüberlagerung mehrerer Anlagen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die von der 26. BImSchV vorgesehene betragsmäßige Addition der einzelnen Grenzwert-Ausschöpfungsgrade zwar eine konservative, jedoch nicht übermäßig vorsichtige und daher durchaus praxisnahe Vorgehensweise zur Sicherstellung der Grenzwerteinhaltung bei der Überlagerung der Felder zweier Niederfrequenzanlagen darstellt. Im Falle der Überlagerung der Felder einer Nieder- und einer Hochfrequenzanlage wurde erkannt, dass aufgrund der Eigenheiten des Nahfeldes der Hochfrequenzanlage und aufgrund der Ausgestaltung der Feldstärkegrenzwerte im Hochfrequenzbereich in der Praxis nur für die elektrische Feldstärke, nicht aber für die magnetische Flussdichte eine Prüfung auf Grenzwerteinhaltung bei Feldüberlagerung erforderlich ist.

Literaturverzeichnis

- [1] Schwab, A. J.: *Begriffswelt der Feldtheorie: Elektromagnetische Felder, Maxwell-Gleichungen, Gradient, Rotation, Divergenz*. 8. Auflage. Springer Vieweg Berlin, 2019. – ISBN 978-3-662-58392-0
- [2] Enders, A.: *Basistext Elektromagnetische Felder*. 2. Auflage. Institut für Elektromagnetische Verträglichkeit, Technische Universität Braunschweig, 2019. – ISBN 978-3-00-063826-8
- [3] Gonschorek, K.-H.: *EMV für Geräteentwickler und Systemintegratoren*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. – ISBN 978-3-540-28297-6
- [4] Pfeifer, H. ; Schmiedel, H. ; Stannarius, R.: *Kompaktkurs Physik: mit virtuellen Experimenten und Übungsaufgaben*. B. G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2004. – ISBN 3-519-00472-0
- [5] Wolfesperger, H. A.: *Elektromagnetische Schirmung: Theorie und Praxisbeispiele*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – ISBN 978-3-540-76913-2
- [6] Henke, H.: *Elektromagnetische Felder: Theorie und Anwendung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001. – ISBN 978-3-662-06975-2
- [7] Ahlbom, A. ; Bergqvist, U. ; Bernhardt, J. H. ; Césarini, J. P. ; DeGruijl, F. ; Grandolfo, M. ; Hietanen, M. ; McKinlay, A. F. ; Owen, R. D. ; Sliney, D. H. ; Stolwijk, J. A. J. ; Swerdlow, A. ; Szabo, L. D. ; Taki, M. ; Tenforde, T. S. ; Vecchia, P. ; Veyret, B. ; Repacholi, M. H. ; Matthes, R.: ICNIRP Statement: General approach to protection against non-ionizing radiation. In: *Health physics* 82 (2002), Nr. 4, S. 540–548
- [8] Ahlbom, A. ; Bergqvist, U. ; Bernhardt, J. H. ; Césarini, J. P. ; Court, L. A. ; Grandolfo, M. ; Hietanen, M. ; McKinlay, A. F. ; Repacholi, M. H. ; Sliney, D. H. ; Stolwijk, J. A. J. ; Swicord, M. L. ; Szabo, L. D. ; Taki, M. ; Tenforde, T. S. ; Jammet, H. P. ; Matthes, R.: ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). In: *Health Physics* 74 (1998), Nr. 4, S. 494–522
- [9] Vecchia, P. ; Hietanen, M. ; Matthes, R. ; Ahlbom, A. ; Breitbart, E. ; de Gruijl, F. R. ; Feychting, M. ; Green, A. ; Jokela, K. ; Lin, J. ; Saunders, R. ; Schulmeister, K. ; Söderberg, P. ; Stuck, B. ; Swerdlow, A. ; Taki, M. ; Veyret, B. ; Ziegelberger, G. ; Repacholi, M. H. ; Roy, C.: ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). In: *Health Physics* 99 (2010), Nr. 6, S. 818–836
- [10] Croft, R. ; Feychting, M. ; Hirata, A. ; d’Inzeo, G. ; Jokela, K. ; Loughran, S. ; Marino, C. ; Oftedal, G. ; Okuno, T. ; van Rongen, E. ; Rösli, M. ; Sienkiewicz, Z. ; Tattersall, J. ; Watanabe, S.: ICNIRP Guidelines for limiting exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz

- to 300 GHz). In: *Health Physics* 118 (2020), Nr. 5, S. 483–524
- [11] Gabriel, S. ; Lau, R. W. ; Gabriel, C.: The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz. In: *Physics in Medicine & Biology* 41 (1996), S. 2251–2269
- [12] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) (Hrsg.): *Fact sheet on the Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz – 100 kHz) published in Health Phys 99(6):818–836; 2010*. November 2010
- [13] Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz — 300 GHz) (1999/519/EG). In: *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L* (1999), Nr. 30.7, S. L199/59
- [14] Bundesamt für Strahlenschutz: *Rechtliche Regelungen und Grenzwerte für den Bereich der niederfrequenten Felder im europäischen Vergleich*. Version: 11. Februar 2020. <https://www.bfs.de/DE/themen/emf/kompetenzzentrum/netzausbau/schutz/grenzwerte-europa.html>
- [15] Strahlenschutzkommission (Hrsg.): *Schutz vor elektrischen und magnetischen Feldern der elektrischen Energieversorgung und -anwendung: Empfehlung der Strahlenschutzkommission*. Verabschiedet in der 221. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 21./22. Februar 2008
- [16] *Verordnung der Bundesregierung: Verordnung zur Änderung der Vorschriften über elektromagnetische Felder und das telekommunikationsrechtliche Nachweisverfahren* (Deutscher Bundestag Drucksache 17/12372 vom 19. Februar 2013)
- [17] Sauer, D. U. (Hrsg.): *Stromnetze – Technologiesteckbrief zur Analyse „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050“*. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. Februar 2016
- [18] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (Hrsg.): *Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder mit Beschluss der 54. Amtschefkonferenz*. In der Fassung des Beschlusses der 128. Sitzung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz am 17. und 18. September 2014 in Landshut
- [19] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (Hrsg.): *Handlungsempfehlungen für EMF- und Schallgutachten zu Hoch- und Höchstspannungstrassen in Bundesfachplanungs-, Raumordnungs- und Planfeststellungsverfahren*. Stand: 01. August 2017
- [20] Bauhofer, P.: *Handbuch für Hochspannungsleitungen: niederfrequente elektromagnetische Felder und deren wirksame Reduktion*. Verband der Elektrizitätswerke Österreichs, 1994. – ISBN 3–9014–1100–3
- [21] Norm DIN EN 50341-1 November 2013. *Freileitungen über AC 1 kV – Teil 1: Allgemeine Anforderungen – Gemeinsame Festlegungen*
- [22] Bernotat, D. ; Rogahn, S. ; Rickert, C. ; Follner, K. ; Schönhofer, C.: *Arbeitshilfe Arten- und gebietsschutzrechtliche Prüfung bei Freileitungsvorhaben*. Bundesamt für Naturschutz, 2018
- [23] Schomerus, T. ; Runge, K. ; Marthen, W. ; Pohlmann, H. ; Butzeck, C. ; Lauer, J. ; Griem, M. ; Lutz, L. ; Sattler, P.: *Bewertung innovativer 380 kV-Freileitungsmastsysteme bezüglich deren rechtlicher Zulässigkeit sowie Landschaftsbildauswirkungen in unterschiedlichen Einsatzgebiete-*

- ten. Bundesamt für Naturschutz, 2016
- [24] Kießling, F. ; Nefzger, P. ; Kaintzyk, U.: *Freileitungen: Planung, Berechnung, Ausführung*. 5. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001. – ISBN 978-3-642-56738-4
- [25] Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN) (Hrsg.): *FNN-Hinweis Minimierung elektrischer und magnetischer Felder von Übertragungs-, Verteil- und Bahnstromnetzen*. 2. Ausgabe Februar 2017
- [26] Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW) (Hrsg.): *DGUV Vorschrift 3 – Unfallverhütungsvorschrift Elektrische Anlagen und Betriebsmittel*. Fassung vom 1. Januar 1997
- [27] Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW) (Hrsg.): *DGUV Vorschrift 3 Durchführungsanweisungen*. aktualisierte Nachdruckfassung Januar 2005
- [28] Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN) (Hrsg.): *FNN-Hinweis Vogelschutzmarkierung an Hoch- und Höchstspannungsfreileitungen*. Dezember 2014
- [29] Brauner, G.: *Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung: Strategien für effiziente Energieversorgung bis 2050*. Springer Vieweg Wiesbaden, 2019. – ISBN 978-3-658-24854-3
- [30] Verband der Bayerischen Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (VBEW) (Hrsg.): *Katalog von Standardanlagen zur Umsetzung des §7 der 26. BImSchV: Elektromagnetische Felder von Niederfrequenzanlagen*. Ausgabe 12.2016
- [31] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau (Hrsg.): *Allgemeine Technische Bestimmungen für die Benutzung von Straßen durch Leitungen und Telekommunikationslinien – ATB-BeStra*. Ausgabe 2008
- [32] Norm DIN 1998 Juli 2018. *Unterbringung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Verkehrsflächen - Richtlinie für die Planung*
- [33] Runge, K. ; Baum, S. ; Meister, P. ; Rottgardt, E.: *Umweltauswirkungen unterschiedlicher Netzkomponenten*. 2012. – im Auftrag der Bundesnetzagentur
- [34] Norm DIN EN 61936-1 VDE 0101-1 Dezember 2014. *Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV*
- [35] Du, Y. ; Burnett, J.: Magnetic Shielding Principles of Linear Cylindrical Shield at Power-Frequency. In: *Proceedings of Symposium on Electromagnetic Compatibility IEEE*, 1996, S. 488–493
- [36] Interner Bericht der Bayernwerk Netz GmbH. Mai 2016
- [37] Interner Bericht der Bayernwerk Netz GmbH. Mai 2003
- [38] Bravo-Rodríguez, J. C. ; del-Pino-López, J. C. ; Cruz-Romero, P.: A Survey on Optimization Techniques Applied to Magnetic Field Mitigation in Power Systems. In: *Energies* 12 (2019), S. 1332
- [39] Farag, A. S. ; Dawoud, M. M. ; Habiballah, I. O.: Implementation of shielding principles for magnetic field management of power cables. In: *Electric Power Systems Research* 48 (1999),

S. 193–209

- [40] Jarass, H. D.: *Bundes-Immissionsschutzgesetz: Kommentar unter Berücksichtigung der Bundes-Immissionsschutzverordnungen, der TA Luft sowie der TA Lärm*. 13. Auflage. Verlag C. H. Beck München, 2020. – ISBN 978–3–406–75344–2
- [41] Röthel, A.: Techniksteuernde Grenzwerte – Gewöhnungseffekte und Zukunftsaufgaben. In: *JuristenZeitung (JZ)* 68 (2013), Nr. 23, S. 1136–1143
- [42] Beckmann, M. (Hrsg.) ; Mann, T. (Hrsg.) ; Durner, W. (Hrsg.) ; Röckinghausen, M. (Hrsg.): *Landmann/Rohmer Umweltrecht: Band I – IV Kommentar*. 92. Ergänzungslieferung. Verlag C. H. Beck München, Februar 2020. – ISBN 978–3–406–75341–1
- [43] Voßkuhle, A. ; Kaufhold, A.-K.: Grundwissen – Öffentliches Recht: Verwaltungsvorschriften. In: *Juristische Schulung (JuS)* (2016), S. 314–316
- [44] Schoch, F. (Hrsg.) ; Schneider, J.-P. (Hrsg.) ; Bier, W. (Hrsg.): *Verwaltungsgerichtsordnung: Band I – II Kommentar*. 38. Ergänzungslieferung. Verlag C. H. Beck München, Januar 2020. – ISBN 978–3–406–75237–7
- [45] Sachs, M. (Hrsg.) ; Schmitz, H. (Hrsg.): *Verwaltungsverfahrensgesetz: Kommentar: Begründet von Prof. Dr. Paul Stelkens, Prof. Dr. Heinz Joachim Bonk und Klaus Leonhardt*. 9. Auflage. Verlag C. H. Beck München, 2018. – ISBN 978–3–406–71095–7
- [46] Koch, H.-J. ; Braun, A.: Aktuelle Entwicklungen des Immissionsschutzrechts. In: *Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht (NVwZ)* (2010), S. 1271–1279
- [47] Klopfer, M. ; Neugärtner, R. D.: *Umweltrecht*. 4. Auflage. Verlag C. H. Beck München, 2016
- [48] Spoerr, W.: Die Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Ausführung des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung. In: *Neue Juristische Wochenschrift (NJW)* (1996), S. 85–88
- [49] Feldhaus, G. (Hrsg.): *Bundesimmissionsschutzrecht*. 31. Update. Rehm Heidelberg München, August 2020
- [50] Hufen, C.: Ermessen und unbestimmter Rechtsbegriff. In: *Zeitschrift für das Juristische Studium (ZJS)* (2010), Nr. 5, S. 603–607
- [51] Kment, M. ; Vorwalter, S.: Beurteilungsspielraum und Ermessen. In: *Juristische Schulung (JuS)* (2015), S. 193–201
- [52] Schütte, P. ; Winkler, M.: Aktuelle Entwicklungen im Bundesumweltrecht. In: *Zeitschrift für Umweltrecht (ZUR)* (2016), S. 186–189
- [53] *Entwurf eines Gesetzes zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge – Bundes-Immissionsschutzgesetz* – (Deutscher Bundestag Drucksache 7/179 vom 14. Februar 1973)
- [54] Kahl, W. (Hrsg.) ; Gärditz, K. F. (Hrsg.): *Umweltrecht*. 11. Auflage. Verlag C. H. Beck München, 2019
- [55] Schenke, W.-R. (Hrsg.): *Verwaltungsgerichtsordnung*. 26. Auflage. Verlag C. H. Beck München, 2020. – ISBN 978–3–406–75084–7

- [56] Koch, H.-J. (Hrsg.) ; Hofmann, E. (Hrsg.) ; Reese, M. (Hrsg.): *Handbuch Umweltrecht*. 5. Auflage. Verlag C. H. Beck München, 2018. – ISBN 978–3–406–71058–2
- [57] Meier, P. ; Jocham, F.: Wie man Argumente gewinnt. In: *Juristische Schulung (JuS)* (2015), S. 490–496
- [58] Waider, G.: EMF-Minimierungsforderungen der 26. BImSchVVwV: Paradigmenwechsel bei der EMVU. In: *Tagungsband der 9. EMV-Tagung „Energieversorgung & Mobilfunk“ des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V. am 5. Mai 2017 in München*
- [59] Gerhardt, M.: Normkonkretisierende Verwaltungsvorschriften. In: *Neue Juristische Wochenschrift (NJW)* (1989), S. 2233–2240
- [60] Wolf, R.: Das Recht im Schatten der Technik. In: *Kritische Justiz* (1986), Nr. 19, S. 241–262
- [61] Köck, W.: Grenzwerte im Umweltrecht: Entwicklung – Rechtsbindung – Perspektiven – unter besonderer Berücksichtigung des Wasserrechts. In: *Zeitschrift für Umweltrecht (ZUR)* (2020), S. 131–141
- [62] Eifert, M.: Letztentscheidungsbefugnisse der Verwaltung: Ermessen, Beurteilungsspielräume sowie Planungsentscheidungen und ihre gerichtliche Kontrolle. In: *Zeitschrift für das Juristische Studium (ZJS)* (2008), Nr. 4, S. 336–343
- [63] Wahl, R.: Risikobewertung der Exekutive und richterliche Kontrollen – Auswirkungen auf das Verwaltungs- und das gerichtliche Verfahren. In: *Neue Zeitschrift für Verwaltungsrecht (NVwZ)* (1991), S. 409–418
- [64] Pautsch, A. (Hrsg.) ; Hoffman, L. (Hrsg.): *VwVfG Verwaltungsverfahrensgesetz Kommentar*. 1. Auflage. Erich Schmidt Verlag Berlin, 2016. – ISBN 978–3–503–16541–4
- [65] Bader, J. ; Funke-Kaiser, M. ; Stuhlfauth, T. ; von Albedyll, J.: *Verwaltungsgerichtsordnung*. 7. Auflage. C. F. Müller Heidelberg, 2018
- [66] Huck, W. ; M., Müller: *Verwaltungsverfahrensgesetz*. 3. Auflage. Verlag C. H. Beck München, 2020 (Beck’sche Kompakt-Kommentare). – ISBN 978–3–406–74952–0
- [67] Voßkuhle, A.: Grundwissen – Öffentliches Recht: Entscheidungsspielräume der Verwaltung (Ermessen, Beurteilungsspielraum, planerische Gestaltungsfreiheit). In: *Juristische Schulung (JuS)* (2008), S. 117–119
- [68] Kraft, I.: Der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit im deutschen Rechtsverständnis. In: *Bayrische Verwaltungsblätter (BayVBl)* (2007), Nr. 19, S. 577–581
- [69] Wienbracke, M.: Der Verhältnismäßigkeitsgrundsatz. In: *Zeitschrift für das Juristische Studium (ZJS)* (2013), Nr. 2, S. 148–155
- [70] Kießling ; Puschmann ; Schmieder: *Fahrleitungen elektrischer Bahnen: Planung, Berechnung, Ausführung, Betrieb*. Publicis Erlangen, 2014. – ISBN 978–3–89578–916–8
- [71] Bauch, A. ; Hetzel, P. ; Piester, D.: Zeit- und Frequenzverbreitung mit DCF77: 1959–2009 und darüber hinaus. In: *PTB-Mitteilungen* 119 (2009), Nr. 3, S. 217–240

- [72] Katzmann, K.: Die Technik der Funkuhren. In: *PTB-Mitteilungen* 119 (2009), Nr. 3, S. 241–252
- [73] Galvan-Tejada, G. M. ; Peyrot-Solis, M. A. ; Jardón-Aguilar, H.: *Ultra Wideband Antennas: Design, Methodologies, and Performance*. CRC Press Boca Raton, 2016. – ISBN 978-1-4822-0651-7
- [74] Burke, G. J.: Numerical Electromagnetics Code – NEC-4, Method of Moments: Part II: Program Description – Theory (UCRL-MA-109338 Pt. II) / Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, California, USA. 1992. – Forschungsbericht
- [75] Burke, G. J.: Ground Model Options in the NEC-4.2 Antenna Code (LLNL-TR-490316) / Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, California, USA. 2011. – Forschungsbericht
- [76] Burke, G. J.: Numerical Electromagnetics Code – NEC-4.2 Method of Moments Part I: User's Manual (LLNL-SM-490875) / Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, California, USA. 2011. – Forschungsbericht
- [77] Loewer, M. ; Igel, J. ; Minnich, C. ; Wagner, N.: Electrical and Dielectric Properties of Soils in the mHz to GHz Frequency Range. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (ISEMA)* Florence, 2016, S. 247–254
- [78] Hehl, O. ; Hoopmann, M. ; Suchenwirth, R. ; Windorfer, A. ; Brüggemeyer, H.: Gesundheitliche Auswirkungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf die Bevölkerung in Niedersachsen — Bestandsaufnahme und Machbarkeitsüberlegungen / Niedersächsisches Landesgesundheitsamt. 2002. – Forschungsbericht

Abbildungsverzeichnis

2.1	Feldlinien eines zylindrischen Leiters	5
2.2	Spiegelladungsprinzip bei zylindrischen Leitern	6
2.3	El. Feldstärke beim Masttyp Donau 74 mit Zaun in unterschiedlichen Abständen von der Trassenachse	10
2.4	Spannungen und Ströme im Drehstromsystem	16
2.5	ICNIRP-Grenzwerte für die elektrische Feldstärke (Allgemeinbevölkerung) [8] [9]	18
2.6	ICNIRP-Grenzwerte für die magnet. Flussdichte (Allgemeinbevölkerung) [8] [9]	19
3.1	Einebene-Einsystem-Geometrie	27
3.2	Wetterfichten-Geometrie	28
3.3	Donau-Geometrie	29
3.4	Einebene-Zweissystem-Geometrie	30
3.5	Tonnen-Geometrie	31
3.6	Tannen-Geometrie	32
3.7	Einebene-Donau-Viersystem-Geometrie	33
3.8	Einebene-Viersystem-Geometrie	34
3.9	Elektrische Feldstärke beim Typ Donau 62 in Abhängigkeit von der Phasenordnung	37
3.10	Magnetische Flussdichte beim Typ Donau 62 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	38
3.11	Magnetische Flussdichte beim Typ Donau 62 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	38
3.12	Elektrische Feldstärke beim Typ Donau 74 in Abhängigkeit von der Phasenordnung	39
3.13	Magnetische Flussdichte beim Typ Donau 74 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	39
3.14	Magnetische Flussdichte beim Typ Donau 74 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	40
3.15	Elektrische Feldstärke beim Typ Donau 106 in Abhängigkeit von der Phasenordnung	40
3.16	Magnetische Flussdichte beim Typ Donau 106 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	41
3.17	Magnetische Flussdichte beim Typ Donau 106 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	41
3.18	Elektrische Feldstärke beim Typ Einebene-Zweissystem 100 in Abhängigkeit von der Phasenordnung	42
3.19	Magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Zweissystem 100 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	42

3.20	Magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Zweissystem 100 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	43
3.21	Elektrische Feldstärke beim Typ Tanne 45 in Abhängigkeit von der Phasenordnung .	43
3.22	Magnetische Flussdichte beim Typ Tanne 45 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	44
3.23	Magnetische Flussdichte beim Typ Tanne 45 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	44
3.24	Elektrische Feldstärke beim Typ Tonne 30 in Abhängigkeit von der Phasenordnung .	45
3.25	Magnetische Flussdichte beim Typ Tonne 30 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	45
3.26	Magnetische Flussdichte beim Typ Tonne 30 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	46
3.27	Extremwerte der elektrischen Feldstärke beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 in Abhängigkeit von der Phasenordnung	48
3.28	Häufigkeitsverteilung der elektrischen Feldstärke beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 in Abhängigkeit von der Phasenordnung	49
3.29	Extremwerte der magnetischen Flussdichte beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	49
3.30	Häufigkeitsverteilung der magnetischen Flussdichte beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung .	50
3.31	Extremwerte der magnetischen Flussdichte beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 mit Stromfluss ---/+++ /+++ /+++ in Abhängigkeit von der Phasenordnung . . .	50
3.32	Häufigkeitsverteilung der magnetischen Flussdichte beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 mit Stromfluss ---/+++ /+++ /+++ in Abhängigkeit von der Phasenordnung	51
3.33	Extremwerte der elektrischen Feldstärke beim Typ Einebene-Viersystem 102 in Abhängigkeit von der Phasenordnung	51
3.34	Häufigkeitsverteilung der elektrischen Feldstärke beim Typ Einebene-Viersystem 102 in Abhängigkeit von der Phasenordnung	52
3.35	Extremwerte der magnetischen Flussdichte beim Typ Einebene-Viersystem 102 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	52
3.36	Häufigkeitsverteilung der magnetischen Flussdichte beim Typ Einebene-Viersystem 102 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	53
3.37	Extremwerte der magnetischen Flussdichte beim Typ Einebene-Viersystem 102 mit Stromfluss ---/+++ /+++ /+++ in Abhängigkeit von der Phasenordnung	53
3.38	Häufigkeitsverteilung der magnetischen Flussdichte beim Typ Einebene-Viersystem 102 mit Stromfluss ---/+++ /+++ /+++ in Abhängigkeit von der Phasenordnung . . .	54
3.39	Sondermastbild SM2 nach Bauhofer [20]	58
3.40	Beispielhafte Phasenbelegung am Mastbild SM2 nach Bauhofer [20]	58
3.41	Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Einsystem 60	61
3.42	Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Einebene-Einsystem 60	62
3.43	Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Wetterfichte 43 . . .	62
3.44	Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Wetterfichte 43	63

3.45	Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Donau 62	63
3.46	Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Donau 62	64
3.47	Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Donau 74	64
3.48	Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Donau 74	65
3.49	Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Donau 106	65
3.50	Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Donau 106	66
3.51	Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Zweissystem 100	66
3.52	Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Einebene-Zweissystem 100	67
3.53	Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Tanne 45	67
3.54	Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Tanne 45	68
3.55	Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Tonne 30	68
3.56	Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Tonne 30	69
3.57	Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Donau- Viersystem 121	69
3.58	Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Einebene-Donau-Vier- system 121	70
3.59	Einfluss der Masthöhe auf die magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Viersystem 102	70
3.60	Einfluss der Masthöhe auf die elektrische Feldstärke beim Typ Einebene-Viersystem 102	71
3.61	Elektrische Feldstärke beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 mit zwei Systemen unter Spannung mit/ohne zusätzliche Erdseile	75
3.62	Magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 mit zwei Systemen unter Spannung mit/ohne zusätzliche Erdseile	75
3.63	Elektrische Feldstärke beim Typ Einebene-Viersystem 102 mit zwei Systemen unter Spannung mit/ohne zusätzliche Erdseile	76
3.64	Magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Viersystem 102 mit zwei Systemen unter Spannung mit/ohne zusätzliche Erdseile	76
3.65	Magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Donau-Viersystem 121 mit zusätzlichen Erdseilen unter Veränderung der Spannfeldlänge	78
3.66	Magnetische Flussdichte beim Typ Einebene-Viersystem 102 mit zusätzlichen Erdseilen unter Veränderung der Spannfeldlänge	78
3.67	Bemäßung bei einsystemiger Anordnung – links Einebene, rechts Dreieck	86
3.68	Bemäßung bei zweissystemiger Anordnung – links Einebene, rechts Dreieck	86
3.69	Magnetische Flussdichte beim Typ 240D47-2-250 mit gleichsinnigem Stromfluss in Ab- hängigkeit von der Phasenanzordnung	89
3.70	Magnetische Flussdichte beim Typ 240D47-2-250 mit gegensinnigem Stromfluss in Ab- hängigkeit von der Phasenanzordnung	90
3.71	Magnetische Flussdichte beim Typ 240E150-2-450 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenanzordnung	90
3.72	Magnetische Flussdichte beim Typ 240E150-2-450 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenanzordnung	91
3.73	Magnetische Flussdichte beim Typ 630D55-2-250 mit gleichsinnigem Stromfluss in Ab- hängigkeit von der Phasenanzordnung	91

3.74	Magnetische Flussdichte beim Typ 630D55-2-250 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	92
3.75	Magnetische Flussdichte beim Typ 630E150-2-450 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	92
3.76	Magnetische Flussdichte beim Typ 630E150-2-450 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	93
3.77	Magnetische Flussdichte beim Typ 1000D96-2-500 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	93
3.78	Magnetische Flussdichte beim Typ 1000D96-2-500 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	94
3.79	Magnetische Flussdichte beim Typ 1000D160-2-1000 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	94
3.80	Magnetische Flussdichte beim Typ 1000D160-2-1000 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	95
3.81	Magnetische Flussdichte beim Typ 2500E400-2-1500 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	95
3.82	Magnetische Flussdichte beim Typ 2500E400-2-1500 mit gegensinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	96
3.83	Extremwerte der magnetischen Flussdichte beim Typ 630D55-3-250 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	96
3.84	Häufigkeitsverteilung der magnetischen Flussdichte beim Typ 630D55-3-250 mit gleichsinnigem Stromfluss in Abhängigkeit von der Phasenordnung	97
3.85	Extremwerte der magnetischen Flussdichte beim Typ 630D55-3-250 mit Stromfluss +++/---/+++ in Abhängigkeit von der Phasenordnung	97
3.86	Häufigkeitsverteilung der magnetischen Flussdichte beim Typ 630D55-3-250 mit Stromfluss +++/---/+++ in Abhängigkeit von der Phasenordnung	98
3.87	Extremwerte der magnetischen Flussdichte beim Typ 630D55-3-250 mit Stromfluss ---/---/+++ in Abhängigkeit von der Phasenordnung	98
3.88	Häufigkeitsverteilung der magnetischen Flussdichte beim Typ 630D55-3-250 mit Stromfluss ---/---/+++ in Abhängigkeit von der Phasenordnung	99
3.89	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 630D55	102
3.90	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 630D55-2-250	102
3.91	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 630D55-3-250	103
3.92	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 630E150	103
3.93	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 630E150-2-450	104
3.94	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 1000D96	104
3.95	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 1000D96-2-500	105
3.96	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 1000D160	105
3.97	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 1000D160-2-1000	106
3.98	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 2500E400	106
3.99	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit von der Verlegetiefe beim Typ 2500E400-2-1500	107
3.100	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 630D55-2 mit Phasenordnung 123/123	109

3.101	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 630D55-2 mit Phasenordnung 123/132	110
3.102	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 630D55-2 mit Phasenordnung 123/213	110
3.103	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 630D55-2 mit Phasenordnung 123/231	111
3.104	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 630D55-2 mit Phasenordnung 123/312	111
3.105	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 630D55-2 mit Phasenordnung 123/321	112
3.106	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 630E150-2 mit Phasenordnung 123/123	112
3.107	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 630E150-2 mit Phasenordnung 123/132	113
3.108	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 630E150-2 mit Phasenordnung 123/213	113
3.109	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 630E150-2 mit Phasenordnung 123/231	114
3.110	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 630E150-2 mit Phasenordnung 123/312	114
3.111	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 630E150-2 mit Phasenordnung 123/321	115
3.112	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 1000D160-2 mit Phasenordnung 123/123	115
3.113	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 1000D160-2 mit Phasenordnung 123/132	116
3.114	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 1000D160-2 mit Phasenordnung 123/213	116
3.115	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 1000D160-2 mit Phasenordnung 123/231	117
3.116	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 1000D160-2 mit Phasenordnung 123/312	117
3.117	Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom System-Achsabstand beim Typ 1000D160-2 mit Phasenordnung 123/321	118
3.118	Magnetische Flussdichte beim Typ 240D47-1 in Abhängigkeit von der Verdrillung . . .	121
3.119	Außenansichten der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Ortsnetzstationen	123
3.120	Beispielhafte Stromaufteilung auf der Niederspannungsverteilung	125
3.121	Aufbau einer Kompaktstation vom Typ 2817 (siehe Tabelle 3.15)	126
3.122	Magnet. Flussdichte in μT bei Kompaktstation 2817 mit NS-Mitteneinspeisung	128
3.123	Magnet. Flussdichte in μT im gesamten Einwirkungsbereich bei Kompaktstation 2817 mit NS-Mitteneinspeisung	129
3.124	Magnet. Flussdichte in μT bei Kompaktstation 2817 mit NS-Seiteneinspeisung	130
3.125	Magnet. Flussdichte in μT im gesamten Einwirkungsbereich bei Kompaktstation 2817 mit NS-Seiteneinspeisung	131

3.126	Aufbau einer Fertigstation vom Typ 4227 (siehe Tabelle 3.15)	132
3.127	Magnet. Flussdichte in μT bei Fertigstation 4227 mit NS-Mitteneinspeisung	132
3.128	Magnet. Flussdichte in μT im gesamten Einwirkungsbereich bei Fertigstation 4227 mit NS-Mitteneinspeisung	133
3.129	Magnet. Flussdichte in μT bei Fertigstation 4227 mit NS-Seiteneinspeisung	134
3.130	Magnet. Flussdichte in μT im gesamten Einwirkungsbereich bei Fertigstation 4227 mit NS-Seiteneinspeisung	135
3.131	Aufsicht des Umspannwerksmodells (siehe Tabelle 3.16, Maßangaben in m)	138
3.132	Seitenansicht des Umspannwerksmodells (Maßangaben in m)	139
3.133	Dreidimensionale Ansicht des Umspannwerksmodells	139
3.134	Aufsicht des Schalthauses im Umspannwerksmodell (Maßangaben in m)	140
3.135	Flussdichteverteilung in μT beim Umspannwerksmodell im Nahbereich in 1 m Höhe . .	143
3.136	Feldstärkeverteilung in kV/m beim Umspannwerksmodell im Nahbereich in 1 m Höhe .	144
3.137	Flussdichteverteilung in μT beim unveränderten Umspannwerksmodell in 1 m Höhe im Einwirkungsbereich	145
3.138	Flussdichteverteilung in μT beim distanzminimierten Umspannwerksmodell in 1 m Hö- he im Einwirkungsbereich	146
3.139	Feldstärkeverteilung in V/m beim unveränderten Umspannwerksmodell in 1 m Höhe im Einwirkungsbereich	147
3.140	Feldstärkeverteilung in V/m beim distanzminimierten Umspannwerksmodell in 1 m Höhe im Einwirkungsbereich	148
3.141	Flussdichteverteilung in μT beim Umspannwerksmodell mit Anbindung im Stich im Nahbereich in 1 m Höhe	149
3.142	Flussdichteverteilung in μT Umspannwerksmodell mit Anbindung im Stich in 1 m Höhe im Einwirkungsbereich	150
4.1	S in Abhängigkeit von der Wandstärke bei gegebenem Rohrdurchmesser	155
4.2	S in Abhängigkeit vom Rohrdurchmesser bei gegebener Wandstärke	155
4.3	Gemessene magnet. Flussdichte in μT am 30-kV-Kabel mit und ohne Stahlrohr	156
6.1	Frequenzabhängige Komponenten der mag. Flussdichte samt betragsmäßiger Addition beim Zweifrequenz-Viersystem-Mast	188
6.2	Vektorielle Summe der mag. Flussdichte beim Zweifrequenz-Viersystem-Mast in Ab- hängigkeit vom Phasenwinkel der Bahnstromkreise	188
6.3	Frequenzabhängige Komponenten der el. Feldstärke samt betragsmäßiger Addition beim Zweifrequenz-Viersystem-Mast	189
6.4	Vektorielle Summe der el. Feldstärke beim Zweifrequenz-Viersystem-Mast in Abhän- gigkeit vom Phasenwinkel der Bahnstromkreise	189
6.5	Frequenzabhängige Komponenten der mag. Flussdichte samt betragsmäßiger Addition bei 50-/16,7-Hz-Parallelführung	190
6.6	Vektorielle Summe der mag. Flussdichte bei 50-/16,7-Hz-Parallelführung in Abhängig- keit vom Phasenwinkel der Bahnstromkreise	190
6.7	Frequenzabhängige Komponenten der el. Feldstärke samt betragsmäßiger Addition bei 50-/16,7-Hz-Parallelführung	191

6.8	Vektorielle Summe der el. Feldstärke bei 50-/16,7-Hz-Parallelführung in Abhängigkeit vom Phasenwinkel der Bahnstromkreise	191
6.9	DCF77-Betriebsantenne [71]	194
6.10	NEC-4.2-Geometrie der DCF77-Sendeantenne (siehe Listing 6.1)	197
6.11	Horizontales Richtdiagramm der DCF77-Sendeantenne	198
6.12	Vertikales Richtdiagramm der DCF77-Sendeantenne	199
6.13	Elektr. Nahfeld der DCF77-Sendeantenne in V/m in 1 m Höhe (x und y in m)	200
6.14	Magnet. Nahfeld der DCF77-Sendeantenne in A/m in 1 m Höhe (x und y in m)	201

Tabellenverzeichnis

2.1	Einwirkungsbereiche gemäß Abschnitt 3.2.1.2 der 26. BImSchVVwV und Abstände gemäß Abschnitt II.3.1 der LAI-Hinweise für ausgewählte Anlagenarten	22
3.1	Maßangaben in m der einsystemigen Mastgeometrien	28
3.2	Maßangaben in m der Donau-Geometrien	29
3.3	Maßangaben in m der Einebene-Zweissystem-Geometrie	30
3.4	Maßangaben in m der Tonnen-Geometrie	31
3.5	Maßangaben in m der Tannen-Geometrie	32
3.6	Maßangaben in m der Einebene-Donau-Viersystem-Geometrie	33
3.7	Maßangaben in m der Einebene-Viersystem-Geometrie	34
3.8	Phasenkombinationen mit gleicher magnetischer Flussdichteverteilung der viersystemigen Mastgeometrien	55
3.9	Phasenkombinationen mit gleicher elektrischer Feldstärkeverteilung der viersystemigen Mastgeometrien	55
3.10	Extremwerte der elektrischen Feldstärke zweissystemiger Mastgeometrien in verschiedenen Abständen von der Trassenachse in kV/m	80
3.11	Extremwerte der magnetischen Flussdichte zweissystemiger Mastgeometrien in verschiedenen Abständen von der Trassenachse bei gleichsinnigem Stromfluss in μT	80
3.12	Extremwerte der magnetischen Flussdichte zweissystemiger Mastgeometrien in verschiedenen Abständen von der Trassenachse bei gegensinnigem Stromfluss in μT	81
3.13	Übersicht über die Nomenklatur der Erdkabel	88
3.14	Phasenkombinationen mit gleicher magnetischer Flussdichteverteilung der dreissystemigen Kabelgeometrien	99
3.15	Erläuterungen zu den Nummern in Abbildung 3.121 und 3.126	127
3.16	Erläuterungen zu den Nummern in Abbildung 3.131	137
6.1	Maßangaben in m der Zweifrequenz-Viersystem-Geometrie (siehe Abbildung 3.7)	187
6.2	Elektrische Feldstärke an der DCF77-Sendeantenne in 1 m Höhe für $y = 0$	203